



METODY ZPRACOVÁNÍ OBECNÝCH TVARŮ PLOCH

Disertační práce

Studijní program: P2302 – Stroje a zařízení
Studijní obor: 2302Vo10 – Konstrukce strojů a zařízení
Autor práce: **Ing. Jiří Šafka, DiS.**
Vedoucí práce: prof. Ing. Přemysl Pokorný, CSc.





SURFACE MACHINING METHODS OF GENERAL SHAPES

Dissertation

Study programme: P2302 – Machine and Equipment Design
Study branch: 2302Vo10 – Machine and Equipment Design
Author: **Ing. Jiří Šafka, DiS.**
Supervisor: prof. Ing. Přemysl Pokorný, CSc.



Prohlášení

Byl jsem seznámen s tím, že na mou disertační práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé disertační práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li disertační práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Disertační práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé disertační práce a konzultantem.

Datum:

Podpis:

Abstrakt

Práce se zabývá problematikou zpracováním a přípravou dat k výrobě obecných tvarů ploch tj. takových, u kterých nejsou jednoznačně definovány zákonitosti či charakter tvorby. Popisuje možnosti definování ploch, problematiku jak určit rozdělení jednotlivých obecných tvarů ploch na sedlovou, konvexní a konkávní část. K vlastnímu rozdělení je nutné nalézt potřebné hranice jednotlivých částí zkoumané plochy. Navrhuje jak takto nově získané plochy (pláty), lze s velkou výhodou použít jako vstupní části ploch pro obrobění. Hlavní předností je možnost tvorby separátně řízeného obrábění pro každou danou oblast rozdělené plochy. Díky tomuto rozdělení je následně rychlejší úprava simulovaného obrábění v CAD/CAM včetně kontroly kolizních stavů. Tento postup umožňuje efektivní obrábění takovýchto ploch a odstraňuje možné chyby, které by omezovaly průběh výroby či mohly znehodnotit výsledky. Navrhovaná metoda je tedy vhodná nejen pro 4osé, ale i 5osé obrábění. Práce obsahuje řadu nových postupů pro externí načítání zkoumaných ploch. Jejich vlastní zpracování a také aplikační testy reálných ploch.

Klíčová slova: CAD/CAM, obecné plochy, víceosé obrábění, křivost plochy

Abstract

This work deals with problems of processing and data preparation of general shaped surfaces i.e. such that are not defined by patterns or characteristics of its development. It describe chances of surface definition, problems how to determine subdivision on convex and concave part. For practical structuring it is necessary to find characteristic boundaries of the investigated surface. For the newly derived surfaces it designs how to apply it with benefits as input part surfaces for finish machining. Its main advantage is the possibility to control separate cutting of every given surface region. Thanks to this surface structuring the subsequent simulated cutting in CAD/CAM is quicker inclusive verification and adjustment of case of collision. This procedure enables possible efficient cutting of such surfaces and eliminates possible mistakes that would limit the productions or could spoil results. Suggested method is not only suitable for 4axis milling, but also for 5axis cutting. The work includes a number of processes for external readout of investigated surfaces, their respective converting as well as the real surface applied tests.

Key words: CAD/CAM, general surface, multiaxis machining, curvature of surface

Poděkování

Velice rád bych chtěl poděkovat prof. Ing. Přemyslu Pokornému, CSc., za cenné odborné rady a celkový přístup v průběhu studia. Dále bych chtěl poděkovat kolegovi Ing. Martinu Lachmanovi, Ph.D. za podporu a konzultace při práci v prostředí Matlab, kamarádovi Ing. Janu Koprnickému, Ph.D. za praktické rady při psaní odborných článků a tvorbě této disertační práce. Velké děkuji také náleží mým rodičům za veškerou podporu v průběhu mého studia.

Výzkum prezentovaný v této práci byl částečně podpořen projektem OP VaVpI Centrum pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace CZ.1.05/2.1.00/01.0005.

Realizace této práce byla podpořena projektem studentské grantové soutěže TUL Komplexní optimalizace výrobních systémů a procesů 2 (interní číslo projektu 28010) v rámci specifického vysokoškolského výzkumu.

Obsah

Seznam zkratk	13
Seznam symbolů	14
1 Úvod	15
2 Cíle práce	20
3 Popis obecných křivek, ploch a jejich tvarů	22
3.1 Matematický popis obecné křivky	22
3.1.1 Parametrické vyjádření křivky	22
3.1.2 Implicitní vyjádření křivky	23
3.1.3 Explicitní vyjádření křivky	23
3.1.4 Další vyjádření křivek	23
3.1.5 Bézierovy křivky	24
3.1.6 Coonsovy (<i>B</i> -spline) křivky	25
3.1.7 NURBS křivky (neuniformní racionální <i>B</i> -spline)	26
3.2 Matematická definice obecných ploch v CAD systémech	26
3.2.1 Matematická definice Bézierovy plochy	27
3.2.2 Matematická definice <i>B</i> -spline plochy	27
3.2.3 Matematická definice NURBS plochy	28
4 Definování převodu dat z CAD do Matlabu – výpočet plátů	29
4.1 Matematický popis STL formátu pro převod dat mezi CAD a Matlab	29
4.1.1 Formát STL	29
4.1.2 Převod formátu STL do programu Matlab	30
4.2 Matematický popis jednotlivých geometrických parametrů ploch	32
4.2.1 Výpočet normálového vektoru plochy	32
4.2.2 Výpočet hlavní křivosti plochy	33
4.2.3 Výpočet Gaussovy křivosti plochy	34
4.2.4 Výpočet střední křivosti plochy	34
4.2.5 Výpočet absolutní, minimální a maximální křivosti plochy	34
4.3 Regionalizace bodů plochy na jednotlivé typy	34
4.4 Definování hranic dílčích částí obecné plochy	37
4.5 Rozdělení obecné plochy	38
4.5.1 Popis algoritmu na rozdělení načtené plochy	38
4.5.2 Určení hraničních částí bodů rozdělené plochy	41

4.6	Výpočet lokálních křivostí jednotlivých plátů a kontrola kolizí	43
4.6.1	Výpočet lokálních křivostí jednotlivých oblastí	44
4.6.2	Kontrola kolizních stavů	44
4.6.3	Popis možných kolizí nástroje a orientace nástroje v různých směrech	47
5	Metody generování NC drah nástroje	50
6	Aplikace metody „členění ploch“	52
6.1	Postup při generování STL dat s využitím SW GOM Inspect V7.5 SR1	52
6.2	Výpočty s využitím programu Matlab pro všechny testované plochy .	53
6.3	Postupy v prostředí Pro/E pro všechny testované plochy	54
6.4	Postupy v programu EdgeCAM (PowerMill) pro všechny testované plochy	58
6.5	Praktické testy algoritmu na definované analytické ploše	58
6.6	Praktické testy zpracování obecných ploch	64
6.6.1	Testovací plocha – č. 1	64
6.6.2	Testovací plocha – č. 2	70
Závěr		75
	Zhodnocení dosažených výsledků	75
	Směry dalšího výzkumu, testování	76
Literatura		77
Autorovy publikace		81
A Přílohy		83
A.1	Obsah CD	83
A.2	Základní struktura programu	83

Seznam obrázků

1.1	Možné typy obecných ploch na průmyslových formách	15
1.2	Ukázka 3D skenování a získání 3D dat [9]	16
1.3	Možné typy frézovacích nástrojů	17
1.4	Úhel odklonu od normály plochy	18
2.1	Vizualizace řešení jednotlivých bodů disertační práce	21
3.1	Parametrické zadání křivky	23
3.2	Kubická Bézierova křivka – definice třemi uzly	24
3.3	Kubická Bézierova křivka – definice čtyřmi uzly	25
3.4	Bézierova plocha s řídicími body	27
4.1	Postup načtení 3D modelu z STL dat do programu Matlab	31
4.2	Rovina plochy s tečnou křivky	32
4.3	Ukázka analytické plochy v prostředí Matlab	36
4.4	Ukázka analytické plochy v prostředí CAD programů	36
4.5	Příklad řetězového kódu pro variantu 0–7. Kde výstupní informace je 000077665555556600000064444444222111112234445652211	41
4.6	Příklad řetězového kódu pro variantu 0–3 a 0–7	42
4.7	Ukázka rozložení matice \mathbf{M}_2 , hledání hraničních bodů	43
4.8	Skutečné profily jednotlivých frézovacích nástrojů dle použitého náklonu vůči obráběné ploše jsou zvýrazněny červeně	45
4.9	Typy možného lokálního podříznutí	46
4.10	Typy možného lokálního podříznutí při obrábění – konkávní 4.10a a konvexní 4.10b	47
4.11	Úhel náklonu a odklonu při 5osém obrábění [34]	48
4.12	Možnosti vedení nástroje v programu EdgeCAM	49
5.1	Využití příčné drsnosti při frézování	51
6.1	Rozdělení obecné plochy na jednotlivé oblasti v prostředí Matlab, zelená oblast – sedlová část, černá oblast – konkávní oblast	53
6.2	Vytvořený program v prostředí Matlab na výpočet křivosti načtené plochy	54
6.3	Importovaná hraniční křivka sedlové oblasti do řešené obecné plochy	56
6.4	Editace křivky – možnost vyhlazení importované křivky pomocí funkce <i>Smooth</i> – zjemnění spline	56

6.5	Využití funkce Style – Surface Trim pro rozdělení plochy	57
6.6	Rozdělená plocha na jednotlivé pláty – barevně zvýrazněná konkávní část	57
6.7	Analyticky definovaná plocha v prostředí Matlab	58
6.8	Analyticky definovaná plocha, výpočet hraničních oblastí, červená barva – sedlová oblast, černá barva – konkávní oblast	59
6.9	Importovaná analyticky definovaná plocha v prostředí Pro/E	59
6.10	Výpočet plošného obsahu plochy v programu Pro/E	60
6.11	Plocha z STL dat, výpočet hraničních oblastí	61
6.12	Obrobená analyticky definovaná plocha v prostředí EdgeCAM	62
6.13	Obrobená analytická plocha v prostředí EdgeCAM	63
6.14	Praktické obrobení analyticky zadané plochy.	64
6.15	Tvorba <i>Obecné plochy</i> č. 1 pomocí funkce <i>Style</i>	65
6.16	Celistvá <i>Obecná plocha</i> č. 1 v Pro/E	65
6.17	Testovaná <i>Obecná plocha</i> č. 1 v prostředí Matlab, včetně výpočtu max. křivostí	66
6.18	Rozdělená <i>Obecná plocha</i> č. 1 v Pro/E na jednotlivé pláty	67
6.19	Obrobená <i>Obecná plocha</i> č. 1 dle navrhované metody v simulátoru obrábění	68
6.20	Obrobená <i>Obecná plocha</i> č. 1 dle navrhované metody z různých úhlů pohledu	69
6.21	Celistvá <i>Obecná plocha</i> č. 2 v Pro/E	70
6.22	Testovaná <i>Obecná plocha</i> č. 2 v prostředí Matlab, včetně výpočtu max. křivostí	70
6.23	Rozdělená <i>Obecná plocha</i> č. 2 v Pro/E na jednotlivé pláty	71
6.24	Obrobená <i>Obecná plocha</i> č. 2, dle navrhované metody	73
6.25	Obrobená <i>Obecná plocha</i> č. 2, dle navrhované metody z různých úhlů pohledu	74

Seznam tabulek

4.1	Částečné matice \mathbf{M} až \mathbf{M}_3	40
6.1	Vypočtené obsahy plochy v jednotlivých programech	60
6.2	Hodnoty K_{max} a R_{max} pro řešenou plochu	61
6.3	Řezné parametry pro obrábění testované plochy	62
6.4	Rozdělení obrábění dle potřebného času	63
6.5	Hodnoty K_{max} a R_{max} pro řešenou <i>Obecnou plochu</i> č. 1	66
6.6	Hodnoty průměrů nástrojů pro řešenou <i>Obecnou plochu</i> č. 1	67
6.7	Řezné parametry pro obrábění <i>Obecné plochy</i> č. 1.	69
6.8	Rozdělení obrábění, dle potřebného času pro <i>Obecnou plochu</i> č. 1 . . .	69
6.9	Hodnoty K_{max} a R_{max} pro řešenou <i>Obecnou plochu</i> č. 2	71
6.10	Hodnoty průměrů nástrojů pro řešenou <i>Obecnou plochu</i> č. 2	71
6.11	Řezné parametry pro obrábění <i>Obecné plochy</i> č. 2	72
6.12	Rozdělení obrábění dle potřebného času pro <i>Obecnou plochu</i> č. 2 . . .	73

Seznam zkratek

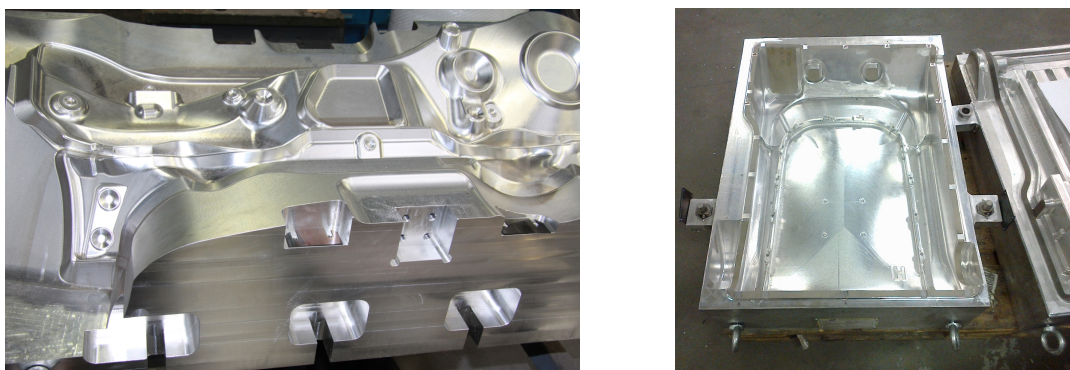
3D	Trojrozměrný prostor (3 Dimensional)
CAD	Počítačem podporovaná konstrukce (Computer Aided Design)
CAM	Počítačem podporovaná výroba (Computer Aided manufacturing)
Pro/E	Softwarový program pro oblast CAD
Catia	Softwarový program pro oblast CAD
EdgeCAM	Softwarový program pro oblast CAM
NC	Číslicové řízení (Numerical Control)
CNC	Počítačem řízené číslicové ovládání (Computer numerical control)
NURBS	Neuniformní racionální B spline (Non-uniform rational B-spline)
CCW	Pohyb v protisměru hodinových ručiček (Counter clockwise)
CW	Pohyb ve směru hodinových ručiček (Clockwise)
CL	CL – data (Cutter location data)
CC	CC – Kontaktní bod nástroje s obráběnou plochou (Cutter Contact)

Seznam symbolů

B	Funkce pro výpočet hranic
$B_i^n(u), B_j^m(v)$	Bernsteinovy polynomy
$B_{i,j}$	Vrcholy polygonální kontrolní sítě
c	Funkce pro detekování dané hranice oblasti
E, F, G	Základní veličiny první základní formy plochy
F	Posuv
H	Střední křivost
k_i	Tečny křivek
K	Gaussova křivost
K_{min}, K_{max}	Minimální a maximální hlavní křivost
K_{max}^S	Maximální křivost plochy (plátu)
L, M, N	Základní veličiny druhé základní formy plochy
$N_i^k(u)$	Bázové B -spline funkce
\mathbf{n}	Normálový vektor plochy
$M_j^l(v)$	Bázové B -spline funkce
$\mathbf{M}_1, \mathbf{M}_2, \mathbf{M}_3$	Základní matice obsahující body jednotlivých oblastí
$\mathbf{p}(\mathbf{t})$	Polohový vektor křivky
$\mathbf{Pb}_1, \mathbf{Pb}_2, \mathbf{Pb}_3$	Pole, která obsahují hraniční body „plátů“
\mathbf{r}	Kolmý vektor k tečnému vektoru \mathbf{t} na ploše $S(u, v)$
R	Poloměr nástroje
R_{eff}	Efektivní (optimální) poloměr nástroje
R_{max}	Maximální poloměr nástroje
$S(u, v)$	Obecná forma plochy
\mathbf{t}	Tečný vektor k dané obecné ploše $S(u, v)$
T	Regulární bod plochy
u, v	Směrové parametry plochy
x_i, x_j	Uzlové body
x, y, z	Souřadnice bodu na obecné ploše
θ	Úhel odklonu nástroje vůči obráběné ploše
τ	Tečná rovina ze skupiny tečných křivek k_i na ploše $S(u, v)$
Φ_1	První základní forma plochy
Φ_2	Druhá základní forma plochy

1. Úvod

Díky vysokému podílu výpočetní techniky v různých průmyslových sférách lze v odvětvích, jako je např. design, konstrukce, výroba, *modelovat* a *vyrábět* složité tvary ploch, které budeme nazývat *obecné plochy*. Využití těchto ploch je například u vstřikovacích forem na obrázku 1.1.

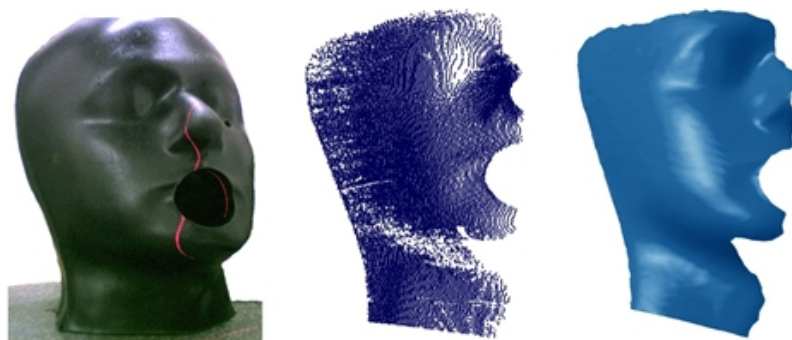


Obrázek 1.1: Možné typy obecných ploch na průmyslových formách

Obecné plochy jsou významně zastoupeny v následujících odvětvích [3]:

- výroba speciálních průmyslových forem (licích, vstřikovacích, tvářecích),
- různé aplikace nástrojů,
- design v automobilovém, lékařském a leteckém průmyslu,
- umělecké či architektonické předměty či stavby.

Mimo virtuální modelování je užíván další způsob získání 3D modelu obecné plochy, což je metoda *Reverse Engineering* – reverzní inženýrství. Podstatou této metody je získání 3D dat z fyzického dílce. Jeden z možných postupů je digitalizace fyzického dílce bezkontaktním optickým skenerem. Výstupním formátem je „mrak bodů“, dále pak „polygonální síť“ – STL formát (více informací o tomto formátu je popsáno v kapitole 4.1.1). Takto získanou polygonální síť lze následně upravovat, případně převést do matematického popisu rovnicemi – pomocí aproximací, proložení tvarů na získaná data (příklad uveden na obr. 1.2.) Praktické využití této metody je např. možnost zaznamenat podobu historických děl – plastiky, jako jsou sochy či jiné kulturní památky. Takto získaná data lze následně využít pro tvorbu potřebných kopií či náhradních částí různých celků.



Obrázek 1.2: Ukázka 3D skenování a získání 3D dat [9]

Obrábění všech tvarově komplikovaných ploch je velice náročné jak časově, tak i technicky. V průmyslové sféře se ještě stále tyto tvary obrábí na 3osých strojích. Bohužel díky tomuto postupu dochází k určitým nepřesnostem. Je zde nutné speciální polohování a přepínání obrobku pro obráběné plochy. Lze tedy říci, že obrábění je možné na těchto strojích pouze s určitou mírou přesnosti. Převážně se však pro zpracování těchto složitých ploch využívají 5osá obráběcí centra. Díky těmto CNC centrům částečně odpadá manipulace s obrobkem. Dochází také k eliminaci chyb, které vznikají nepřesným ustavením obrobku v pracovním prostoru stroje.

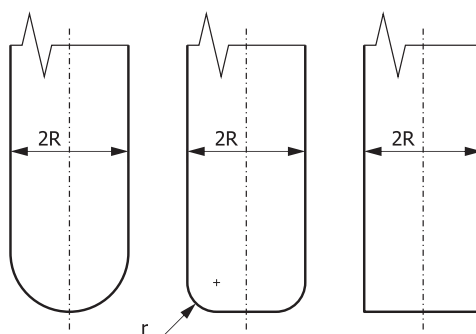
Pro obrobení obecných ploch se často využívá jen jeden nástroj, který obrobí celou obecnou plochu. Pak je třeba počítat s vyšší časovou náročností na obrobení a možnými chybami. Nežádoucí jevy je možno eliminovat použitím nástroje s odpovídajícím průměrem. Díky tomu lze odebrat maximální možný přebytečný materiál a následný nástroj použít pro zbytkové obrobení části obecné plochy. Výsledkem je nejen snížení časové náročnosti obrobení, ale také nižší počet nástrojů nutných k obrobení plochy a omezení výskytu chyb např. podřezáním.

Důležité je vlastní definování použitého nástroje pro obrábění tvarově složitého dílce (obecné plochy), kdy je nutné zohlednit maximální možný použitelný průměr nástroje a to tak, aby nedošlo k lokálnímu podřezání tj. znehodnocení obrobku. Je tedy nezbytná znalost, zda je tvar části obecné plochy konkávní a sedlový a jaký je stupeň zakřivení. Tato kontrola většinou probíhá v systémech CAM, kde lze virtuálně kontrolovat *podřezání* či kolize nástroje s obráběným dílcem.

Při obrábění různých tvarů obecných ploch se převážně postupuje od hrubovacích po dokončovací operace. V případech, kde je nutné dosáhnout nízké drsnosti obráběné plochy, se využívá *leštění* – *lapování*. Tyto operace se většinou používají při dokončování např. plastikářských forem. V prvních hrubovacích procesech je nutné odstranit velké množství obráběného materiálu. Následkem těchto procesů jsou velké řezné síly, které jsou kladeny na nástroj. U těchto operací – postupů, není prioritně důležitá kvalita obrobené plochy, ale rychlost ekonomičnost obrobení, tj. kolik hrubovacích operací lze provést jedním nástrojem než dojde k jeho otupení. Veškeré následné dokončovací operace jsou vesměs prováděny s konstantním přírůstkem na dokončení. Zde vzniklé řezné síly na nástroj jsou zanedbatelné, protože množství odebíraného materiálu je nízké. Vysoký požadavek je však kladen na jakost obrobené plochy. Odstranit stopy nástroje lze po dokončovacích operacích leštěním. Leštění

je operace, která se provádí ručně a tím dochází k tvorbě určitých geometrických, ale i rozměrových nepřesností. Čas nutný na leštění je velice závislý na tvaru, ale i velikosti funkční plochy. V odborné knize [39] se uvádí, že až 73 % celkového času na obrábění se spotřebuje na dokončovací operace.

Klasická výroba obecných ploch se nejčastěji provádí na 3osých strojích. Použitým nástrojem je kulová fréza nebo fréza s kulovým koncem zobrazené na obrázku 1.3. Nástroj je řízen ve třech směrech, tj. poloha nástroje vzhledem k obecné poloze plochy je určena třemi souřadnicemi. Při obrábění má osa nástroje konstantní polohu a je snadné ji definovat vzhledem k povrchu obráběné plochy. Bohužel tento způsob procesu je neproduktivní a neefektivní [38]. Při využití 5osého obrábění, lze opět využít kulový nástroj, ale v rámci obráběcího procesu i naklánět osu nástroje vůči obráběné ploše a to v potřebných režimech. Výsledkem této úpravy je nejen zrychlení celého cyklu obrábění, ale i zvýšení kvality obrobené plochy. Také dojde i ke zvýšení efektivity obrábění [8].



Obrázek 1.3: Možné typy frézovacích nástrojů

Pro dokončovací operace obecných ploch je omezen průměr kulového frézovacího nástroje křivostí vydutých tvarů. Překročení použitého průměru nástroje se nejčastěji projeví podřezáním obráběné plochy.

Je tedy nutné při definování nástroje zabezpečit správný poměr mezi poloměrem použitého kulového nástroje a poloměrem křivosti obráběné plochy a to tak, aby nedošlo k vlastnímu podřezání obráběné plochy viz rovnice 1.1. Pro výpočet maximálního použitelného nástroje pro obrábění dané plochy lze využít tento vztah [5, 38].

$$R_{max} = \frac{1}{K_{max}^S} \quad (1.1)$$

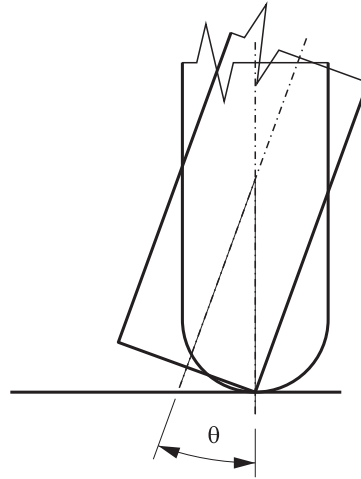
K_{max}^S – maximální křivost plochy určená k obrábění, R_{max} – maximální poloměr kulové frézy.

Při využití jiných tvarových konců frézy než kulového, např. válcový, je nutné upravit matematický vztah. Zde použitý poloměr nástroje je menší než minimální poloměr křivosti obráběné obecné plochy. Lze tedy efektivní poloměr nástroje R_{eff} spočítat na níže popsaném vztahu [39].

$$R_{eff} = \frac{R}{\sin \theta} \quad (1.2)$$

R_{eff} – efektivní poloměr nástroje, R – poloměr nástroje (válcová fréza), θ – úhel odklonu.

Úhel odklonu – úhel mezi normálou plochy a osou nástroje je zobrazen na obrázku 1.4.



Obrázek 1.4: Úhel odklonu od normály plochy

Pokud by se jednalo o válcovou frézu, která má rohový rádius je rovnice upravena o tento rádius [39].

$$R_{eff} = \frac{R - r}{\sin \theta} \quad (1.3)$$

R_{eff} – efektivní poloměr nástroje, R – poloměr nástroje (válcová fréza), r – rohový radius nástroje, θ – úhel odklonu.

Porovnáním jednotlivých rovnic je u nástroje s kulovým zakončením je efektivní poloměr stejný jako jeho kulové zakončení, viz rovnice 1.1.

Využitím válcového nástroje oproti kulovému dostáváme dvě podstatné výhody:

- při požadavku na stejnou příčnou drsnost povrchu (jedná se o vlastní výšku nerovnosti, která je závislá na vzdálenosti dvou po sobě následujících drahách nástroje), lze zvolit vyšší rozteč drah nástroje než při kulovém nástroji. Díky tomu docílíme velkých úspor v *jednotlivých vrstev* obrábění (drah nástroje), ale i k velké *redukci času* nutného pro vlastní obrobení dané plochy [19, 22],
- vyšší životnost válcového nástroje oproti kulovému zakončení, kde je řezné rychlost v ose u tohoto nástroje nulová. [36].

Využitím určitých postupů, metod i různých typů nástrojů lze významně snížit celkovou časovou náročnost na obrobení a tím zvýšit produktivitu obrábění. Pokud bude volen pouze jeden nástroj pro obrábění celého povrchu, bude výsledná produktivita velice nízká.

Volba průměru nástroje je ovlivněna nejmenším poloměrem zakřivení obráběného povrchu. Poloměr tohoto nástroje musí být rovný či menší než je toto zakřivení plochy. Tato pravidla platí jak pro 3osé, tak pro 5osé obrábění [20, 23, 24].

Obecně se veškeré obráběné povrchy skládají z několika menších částí: *rovinné, konvexní, konkávní, sedlové, eliptické, parabolické, hyperbolické a planární*. Je tedy výhodné použít pro každou tuto část obrobení odpovídajícím nástrojem a tím rapidně snížit nutný čas pro obrobení. Dále lze využít i jiný způsob řízení nástroje pro jednotlivé obráběné části. Výsledkem je zabránění případným kolizím a zvýšení kvality obrobené plochy [18, 31].

U produkčních CAD/CAM systémů např. EdgeCAM, lze efektivně kontrolovat případné kolize simulací obrábění. V případě kolize je možno upravit parametry obrábění tak, aby nedošlo ke kolizi či podřezání. Výstupem je změněný ISO kód s G funkcemi. V případě kdy se kontrola obrábění (simulace) provádí pouze na CNC stroji, bez využití simulace v CAM programu je tento postup neefektivní. Důvodem je zdlouhavé testování na stroji. Za předpokladu využití rozdělení ploch na jednotlivé části lze obráběné plochy velice snadno upravovat (způsob obrobení, zamezení kolizí a podřezání) a tím zrychlit vlastní tvorbu NC kódů.

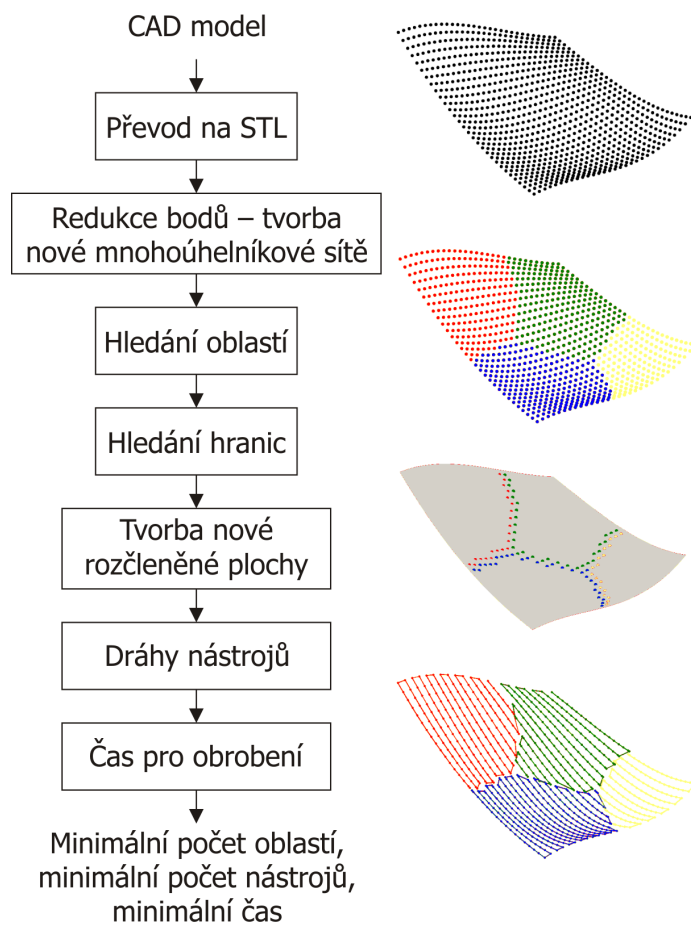
2. Cíle práce

Cílem práce je navrhnout a otestovat metodu, která umožní zpracovat CAD data popisující obecnou plochu, dále vyhledání oblastí dle křivostí na této obecné ploše a jejich následné rozdělení do tříd podle zadaných parametrů. Dalším cílem je definovat vhodné způsoby obrábění tak, aby nedocházelo k případným kolizím mezi nástrojem a obrobkem nebo k podřezání obráběné plochy.

Dílčí úkoly k řešení cílů jsou:

1. Specifikovat a matematicky popsat obecný tvar plochy, vlastní popis všech nezbytných složek včetně normál k dané ploše a potřebných křivostí ploch.
2. Otestovat metodu dělení obecné plochy na jednotlivé pláty. Vymezit jednotlivé přechodové hranice mezi sousedními plochami dle specifických vlastností plochy.
3. Vytvořit testovací CAD modely obecných ploch, na kterých následně aplikovat zvolenou metodu včetně rozložení řešených ploch. Definovat hraniční křivky (hranice).
4. Generovat dráhy nástrojů pro rozdělené plochy s využitím různých způsobů řízení nástroje při víceosém obrábění tak, aby nedocházelo ke kolizím a podřezání.
5. Porovnat nový přístup tvorby NC drah nástroje s konvenčním způsobem z hlediska četnosti kolizí, podřezání, velikostí kódů, produktivity.
6. Zhodnotit praktické testy obráběných vzorků dle doporučené metody.

Přehledná vizualizace řešení jednotlivých bodů disertační práce je uvedena na obrázku 2.1.



Obrázek 2.1: Vizualizace řešení jednotlivých bodů disertační práce

3. Popis obecných křivek, ploch a jejich tvarů

Data popisující obecné plochy mohou být získána z fyzických modelů – skenováním (Reverse Engineering) nebo konstruovány modelováním pomocí CAD/CAM systémů na počítači. Ve většině případů se jedná o plochy tvořené s užitím kontrolních bodů – Bézierovy plochy, *B*-spline křivky nebo s využitím NURBS metody (Non-uniform Rational *B*-spline) [3]. Takto definované typy ploch jsou hojně využívány v běžných středních CAD programech.

3.1 Matematický popis obecné křivky

Existuje řada možností, jak popsat obecné tvary ploch. Mezi nejznámější patří Bézierovy plochy, kde se využívá aproximace obecné plochy dle daných bodů. Základní variantou je použití *B*-spline křivek či NURBS metody [3]. Matematické vyjádření křivek v CAD systémech se provádí tak, že křivky jsou představovány matematickými rovnicemi. Pokud je třeba, CAD systém provede vygenerování – zobrazení křivky na monitoru. Matematické definování prostorových křivek je možné třemi způsoby [32]:

- parametricky,
- implicitně,
- explicitně.

3.1.1 Parametrické vyjádření křivky

Jedná se o nejčastěji používané vyjádření v CAD systémech. Parametrické vyjádření má tento tvar [32]:

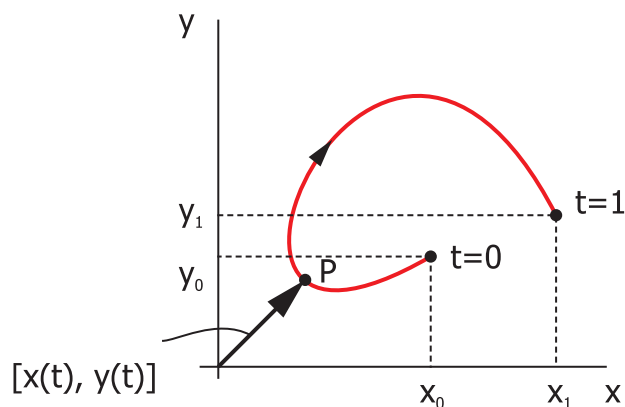
$$x = x(t), y = y(t), z = z(t), (t \in I), \quad (3.1)$$

kde I je interval od $(-\infty, +\infty)$ a argument t je parametr křivky.

Většinou se využívá vektorový zápis dle rovnice 3.2.

$$\mathbf{p}(t) = [x(t), y(t)], \quad (3.2)$$

kde $\mathbf{p}(t)$ je polohový vektor (na obrázku 3.1) a t je v intervalu od 0 do 1.



Obrázek 3.1: Parametrické zadání křivky

3.1.2 Implicitní vyjádření křivky

Použití tvaru:

$$F(x, y, z) = 0 \quad (3.3)$$

Tento způsob vyjádření křivky není vhodný pro CAD systémy. Důvodem je nemožnost postupného výpočtu bodu křivky. Využití tohoto vyjádření lze použít při řešení průsečíku křivek a následně na to i ploch v 3D rozměru [32, 33].

3.1.3 Explicitní vyjádření křivky

Reprezentace pomocí funkce

$$y = f(x), \quad (3.4)$$

kde z je konstanta. Dle tohoto zadání se jedná o rovinnou křivku, neboť celá leží v rovině xy .

3.1.4 Další vyjádření křivek

Dále je možné rozdělit matematické křivky na:

- aproximační křivka – neprochází nezbytně zadanými body,
- interpolační křivka – prochází zadanými body.

Body, kterými daná křivka prochází či je jimi definována jsou odbornou literaturou popsány jako uzly případně uzlové body. V systému CAD/CAM – Pro/E lze například body proložit křivkou typu *spline*. Spline křivky se především používají pro volný design. Stupeň polynomu je klíčovým kritériem pro definici křivek, protože určuje míru vyhlazení a přesnost geometrie [32, 33]. Nejvíce známé a používané jsou tyto typy křivek, které jsou pojmenovány po svých tvůrcích:

Bézier – zavedl aproximační plochy zadávané pomocí sítí bodů. Sít bodů lze velmi snadno intuitivně ovládat.

Ferguson – definoval křivku, případně plochu, tvořenou pomocí okrajových podmínek (zadáním polohy bodu a tečny v krajním bodu).

Coons (*B-spline*) – vypracoval zobecnění Fergusonovy křivky a plochy, a zavedl pojem tzv. *spline* a *B-spline*. Spline je funkce, která je po částech polynomiální.

Barsky – zobecnil *B-spline* a zavedl β -spline, které umožňují pomocí dvou intuitivních parametrů kontrolovat výsledný tvar křivky nebo plochy.

3.1.5 Bézierovy křivky

Beziérovky křivky aproximují posloupnost alespoň dvou uzlů. Dva body = aproximační křivka (úsečka) [33, 41]. Základními vlastnostmi Beziérovky křivky jsou:

- Křivka začíná a končí v prvním a posledním uzlu, vždy prochází těmito uzly.
- Křivka se na koncích přimyká ke spojnici krajních uzlu.

Typy Beziérovky křivek:

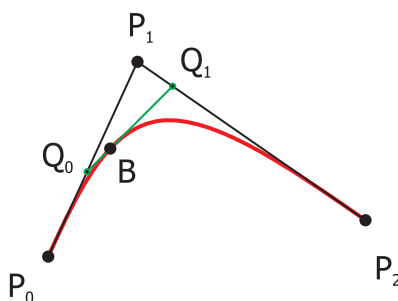
- obecná,
- kubická,
- kvadratická.

Obecná Bézierova křivka

Tuto křivku lze definovat pomocí *libovolného počtu uzlů*. Značná nevýhoda spočívá v tom, že při úpravě pozice vnitřního uzlu u křivky dojde k úpravě celé křivky tj. úprava jednoho bodu ovlivňuje celou křivku. Další nevýhodou je složitý průběh křivky, kde je potřebné aproximovat křivkou vyššího řádu, například deset. To má za následek vysokou výpočtovou náročnost.[41]

Kubická Bézierova křivka

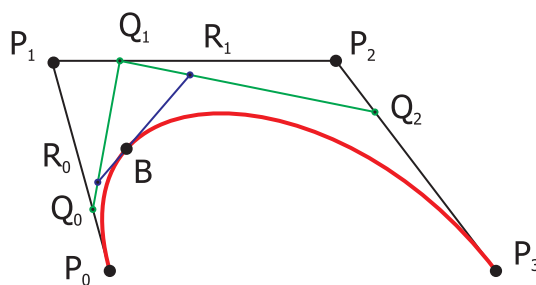
Tato křivka je definována *třemi uzly*, jak popisuje obrázek 3.2.



Obrázek 3.2: Kubická Bézierova křivka – definice třemi uzly

Kvadratická Bézierova křivka

Tato křivka je definována *čtyřmi uzly*, jak popisuje obrázek 3.3.



Obrázek 3.3: Kubická Bézierova křivka – definice čtyřmi uzly

Kubická a kvadratická Bézierova křivka umožňuje lokální úpravu v průběhu křivky. Výsledkem je rozložení složité křivky na menší úseky. Tyto úseky se proloží křivkami s menším stupněm polynomu, avšak je nutné dodržovat určité podmínky:

1. zajistit spojitost celé křivky,
2. dodržet hladkost v důležitých uzlech křivky.

Spojitosť zajistíme tak, že se využije stejná pozice pro koncový bod (uzel) předcházející křivky a vstupní bod (uzel) následující křivky. Hladkost křivky je zabezpečena tak, že uzly leží na jedné přímce a splňují tato tři kritéria:

1. předposlední uzel je umístěn do předcházející křivky,
2. koncový a počáteční bod leží na jedné přímce,
3. druhý uzel následující křivky leží na jedné přímce.

Pro přidání další křivky je vždy vyžadováno zadání dalších dvou nových uzlu.

3.1.6 Coonsovy (B-spline) křivky

Tyto křivky se v základu podobají B-spline křivkám – Bézierovým křivkám, ale potlačují jejich nevýhody při hladkém napojování. Jednotlivé typy B-spline křivek jsou stejné jako u Bézierových křivek (obecná, kubická, kvadratická) viz Bézierovy typy křivek 3.1.5. Nejčastěji se využívá kubická křivka, kterou definujeme pomocí čtyř uzlů [33, 41].

Výhodné vlastnosti B-spline křivek (oproti Bézierovým křivkám):

- při napojování další křivky stačí přidat jeden nový uzel,
- složená křivka je vždy hladká,
- složená křivka je vždy spojitá – spojitost druhého řádu.

V případě, že je potřeba, aby křivka začínala v určitém bodě, je nutné použít vícenásobného uzlu – ztotožnění několika sousedních uzlů křivky. V případě, že leží vícenásobný uzel uvnitř křivky, je možné vytvářet ostré hrany na křivce.

3.1.7 NURBS křivky (neuniformní racionální B-spline)

NURBS je tvořena jako aproximační křivka. Tato křivka neprochází definovanými řídicími body. Tento typ křivek je vhodný pro práci s velkým množstvím vstupních dat (bodů), které jsou zatíženy značnou chybou. Výsledkem je vyhlazená křivka, která neprochází vstupními daty (body). Pokud jsou vstupní data přesná je praktické použít interpolační křivku. Tato interpolační křivka pak prochází vstupními body. Interpolační křivku, však nelze spočítat přímo. Sice známe polohu vstupních bodů, které leží na křivce, avšak není známa poloha řídicích bodů NURBS křivky. Je tedy nutné nejprve sestavit rovnice pro výpočet řídicích bodů a tyto body vypočítat. Pak následně spočítat samotnou interpolační křivku [33, 41].

3.2 Matematická definice obecných ploch v CAD systémech

Analytický předpis obecných ploch v CAD systémech se provádí tak, že plochy jsou představovány matematickými rovnicemi, obdobně jako u křivek, a to tedy [22]:

- explicitně $\rightarrow z = f(x; y)$,
- implicitně $\rightarrow F(x; y; z) = 0$,
- parametricky $\rightarrow x = x(u; v); y = y(u; v); z = z(u; v)$.

Nejvíce využívaný typ zápisu, je zápis **parametrický**:

$$S(u; v) = [x(u; v); y(u; v); z(u; v)],$$

kde parametry u a v tvoří tzv. křivočaré souřadnice $(u; v)$ bodu na ploše.

Další možný způsob zadání ploch lze pomocí:

1. hraničních křivek, např. Bézierovy plochy,
2. sítě bodů,
3. vytvořené křivky – rotační plochy (vznik pomocí rotace křivky kolem přímky (osy)),
4. vytvořené křivky – tažené plochy (vznik pomocí křivky, která je tažená v určitém směru (osy)).

3.2.1 Matematická definice Bézierovy plochy

Při tvorbě Bézierovy plochy se využívá parametrických prostorových Bézierových křivek. Výsledná Bézierova plocha je tvořena čtyřmi okrajovými křivkami, které jsou zobrazeny na obrázku 3.4. Rohové body sítě jsou rohovými body Bézierovy plochy. Okrajovými křivkami Bézierovy plochy jsou Bézierovy křivky tvořené okrajovými lomenými čarami sítě [22].

$S_{i,j}$ tvoří řídicí síť Bézierovy plochy a $B_i^n(u)$, $B_j^m(v)$ jsou Bernsteinovy polynomy. Výraz $B_i^n(u)$, $B_j^m(v)$ tvoří Bernsteinovy polynomy dvou proměnných u, v stupně (m, n) v rozmezí $(0 \leq i \leq n; 0 \leq j \leq m)$.

Bézierova plocha stupně $m \times n$ je definována vzorcem:

$$S(u, v) = \sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^n P_{ij} B_i^n(u) B_j^m(v) \quad (3.5)$$

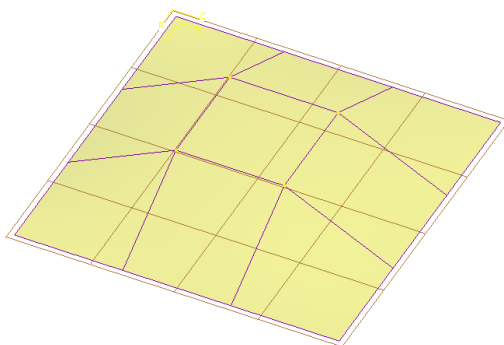
Bernsteinovy polynomy jsou také známé jako báze funkce, kde

$$B_i^k(t),$$

kde $k = n, m$.

$$B_i^k(t) = \binom{k}{i} t^i (1-t)^{k-i},$$

kde $t \in [0, 1]$ dále $i = 0, 1 \dots k$.



Obrázek 3.4: Bézierova plocha s řídicími body

Hlavní nevýhodou takto tvořených ploch je horší variabilita při navazování jednotlivých segmentů ploch z hlediska spojitosti. Dále nemožnost provádět lokální změny řídicích bodů (vrcholů) v síti. Změna polohy řídicího bodu se projeví na celé síti. Tyto nedostatky řeší B -spline plochy.

3.2.2 Matematická definice B-spline plochy

Tento typ ploch překonal omezení Bézierových ploch a to v možnosti změny lokální polohy řídicího bodu (vrcholu) v dané síti, ale i snadnější navazování jednotlivých segmentů plochy [41, 22].

B -spline plocha je definována vzorcem:

$$S(u, v) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m B_{ij} B_i^k(u) M_j^l(v), \quad (3.6)$$

kde $u_{min} \leq u \leq u_{max}, v_{min} \leq v \leq v_{max}$

Bázové B -spline funkce jsou $N_i^k(u)$ a $M_j^l(v)$ s parametry u a v v příslušných směrech. $B_{i,j}$ jsou vrcholy polygonální kontrolní sítě.

$$N_i^0(u) = \begin{cases} 1 & \text{pro } x_i \leq u \leq x_{i+1} \\ 0 & \text{v ostatních případech} \end{cases} \quad (3.7)$$

$$N_i^k(u) = \frac{(u - x_i) N_i^{k-1}(u)}{x_{i+k-1} - x_i} + \frac{(x_i - u) N_{i+1}^{k-1}(u)}{x_{i+k} - x_{i+1}} \quad (3.8)$$

$$M_j^1(v) = \begin{cases} 1 & \text{pro } y_i \leq v \leq y_{i+1} \\ 0 & \text{v ostatních případech} \end{cases} \quad (3.9)$$

$$M_j^l(v) = \frac{(v - y_j) M_j^{l-1}(v)}{y_{j+l-1} - y_j} + \frac{(y_{j+l} - v) M_{j+1}^{l-1}(v)}{y_{j+l} - y_{j+1}}, \quad (3.10)$$

kde x_i a y_j jsou prvky uzlových vektorů sítě.

3.2.3 Matematická definice NURBS plochy

Zkratka NURBS (Non Uniform Rational B -Spline) – neuniformní racionální B -spline reprezentuje matematické vyjádření daných křivek (ploch) pomocí vážených kontrolních bodů a uzlového vektoru sítě. NURBS plochy jsou velice oblíbené pro svoji velkou flexibilitu. Umožňují tolik potřebnou a žádanou lokální změnu tvaru křivky, bez celkové změny tvaru sítě, tj. jsou neměnné vůči lokálním transformacím. V současnosti se hojně využívají v CAD/CAM systémech [41, 22]. NURBS plocha je definována vzorcem 3.11:

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^{n+1} \sum_{j=0}^{m+1} h_{i,j} B_{i,j} N_i^k(u) M_j^l(v)}{\sum_{i=0}^{n+1} \sum_{j=0}^{m+1} h_{i,j} N_i^k(u) M_j^l(v)}, \quad (3.11)$$

kde $B_{i,j}$ jsou souřadnice vrcholů (kontrolní body) a $h_{i,j}$ jsou souřadnice vstupních bodů sítě; $N_i^k(u)$ a $M_j^l(v)$ jsou základy neracionální B -spline funkce.

NURBS mají obrovskou výhodu, že mají možnost přiřadit ke každému řídicímu bodu určitou váhu či tvar uzlového vektoru, tyto hodnoty lze korigovat tak, že lze lokálně měnit tvar dané plochy.

NURBS plochy umožňují přesně popsat kuželosečky. Díky tomu, lze velice jednoduše konstruovat základní tělesa typu kužel, válec, anuloid atd.

4. Definování převodu dat z CAD do Matlabu – výpočet plátů

V CAD/CAM systémech je spline, či 3D plocha, popsána dle vnitřního matematického předpisu. Tento předpis většinou není pro uživatele těchto programů znám. Existuje však několik možností, jak provést převod virtuálního 3D modelu z jednoho systému do druhého. Jednou z variant je využití STL formátu.

4.1 Matematický popis STL formátu pro převod dat mezi CAD a Matlab

Přesto, že existuje mnoho postupů a metod, jak popsat matematicky obecnou plochu, není jich mnoho použitelných v praxi. Při převodu 3D modelu (i obecné plochy) do jiného CAD programu se využívají různé standardizované formáty (STEP, Parasolid, IGES), všechny tyto formáty splňují normu ISO. Norma stanovuje vnitřní postup tvorby matematického popisu geometrie plochy či jiných útvarů pro daný formát. Bohužel tyto formáty nejsou použitelné pro vývoj a výpočtové úpravy v jiných programech např. Matlab. Tento program byl vybrán z důvodu možného doprogramování jednotlivých funkcí a také navazuje na předešlou práci Dr. Tuonga [31], který tento program využíval. Problematickou částí je nesourodý popis jednotlivých prvků daného modelu (plochy) v jednotlivých formátech. Nejvýhodnější možností jak importovat data obecné plochy z CAD programu do programu Matlab se jeví využití formátu STL. Díky tomuto formátu lze načítat řešenou plochu tak, aby byla přístupná k plánovaným matematickým úpravám [15].

4.1.1 Formát STL

Formát STL popisuje matematicky vnější obal daného objektu např. plochy. Odvozuje se převážně od *fotogrammetrie*, kde je objekt (plocha) popsán mrakem bodů. Hlavní využití tohoto formátu je především pro technologie *Rapid Prototyping* a *Reverse Engineering* (3D tisk, 3D skenování). Jedná se vlastně o množinu – soubor malých trojúhelníků, kde každý trojúhelník je popsán souřadnicemi třech bodů. Každý trojúhelník také obsahuje doplňkovou informaci – normálový vektor tak, aby byla definována vnější případně vnitřní strana dané plochy (trojúhelníku). Velikostí použitých trojúhelníků přímo ovlivňuje přesnost nově tvořené 3D sítě. Pokud zvolíme velké trojúhelníky, může dojít ke ztrátě informace o daném lokálním tvaru řešené

plochy. Proto je výhodné s využitím počítačové techniky používat velice jemné sítě se stovkami těchto trojúhelníků [9].

4.1.2 Převod formátu STL do programu Matlab

V programu Matlab nelze s použitím programových balíčků (toolbox) dodávaných výrobcem softwaru načíst CAD formát STL. Existuje však mnoho postupů a metod, jak vytvořit algoritmus pro matematický import formátu *STL* do tohoto prostředí. Zpracováním algoritmu pro načítání externích dat do programu Matlab se věnuje několik výzkumných týmů a vědců. Jedním z nich je *Francis Esmonde-White*, který upravil algoritmus od *Michaela Morrise* [15]. Díky podstatné úpravě algoritmu (algoritmus rozšířen o funkci odstranění duplikačních bodů z dané sítě), došlo k rapidnímu zrychlení načítání a práce s objemnými soubory. Klíčovým postupem algoritmu je v sousledném načítání všech vrcholových bodů trojúhelníků do matice včetně informace o směru normálového vektoru. Dále je hledán sousedící trojúhelník tak, aby byla popsána celistvá zkoumaná plocha.

Algoritmus pro načtení STL formátu v programu Matlab

Použitý zápis funkce v prostřední Matlab, dle *Francise Esmoda* [15], je následující:

```
[F,V,N] = STLREAD(FILENAME)
```

Po spuštění funkce *STLREAD* se načte STL soubor a spočítají se matice **F**, **V**, **N**. Matice **F** obsahuje seznam bodů, které tvoří jednotlivé trojúhelníky dané sítě. Matice **V** obsahuje souřadnice veškerých použitých bodů v dané síti. Matice **N** obsahuje seznam normálových vektorů pro jednotlivé trojúhelníky sítě. Výstupní částí algoritmu jsou tedy tři matice, v našem případě se pouze využívá matice **V**.

Převod trojúhelníkové sítě na čtyřbodovou síť (mnohoúhelníková síť)

Jak je výše popsáno, neexistuje jednoznačný způsob načtení externích dat do prostředí Matlab. Vše je prováděno pomocí algoritmů a funkcí, které nejsou vždy v základním ani rozšířeném vydání tohoto programu. *Connors* [15] používá pro převod algoritmus, který využívá proložení úsečky či spline mezi danými body (v našem případě matice bodů **V**). Výhodou tohoto algoritmu je možnost nastavení případné rozteče jednotlivých bodů použité spline či úsečky. Získaná data v matici **V** se použijí následovně:

```
vout=V  
rangeX=floor(min(vout(:,1))):0.1:ceil(max(vout(:,1)));
```

Tato funkce nalezne minimum a maximum v dané matici pro hodnoty x . Následně rozdělí tento úsek s danou roztečí bodu 0,1 (předepsané ve funkci). Výsledné body zapíše do vektoru *rangeX*. Aplikace této funkce se opakuje i pro souřadnice y v dané matici:

```
rangeY=floor(min(vout(:,2))):0.1:ceil(max(vout(:,2)));
```

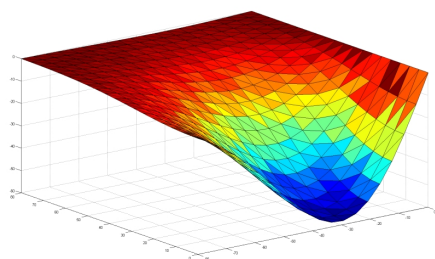
Pro vytvoření všech souřadnic dané mřížky je použita funkce `meshgrid`, která dané souřadnice uloží do matic **X** a **Y**:

```
[x,y]=meshgrid(rangeX,rangeY);
```

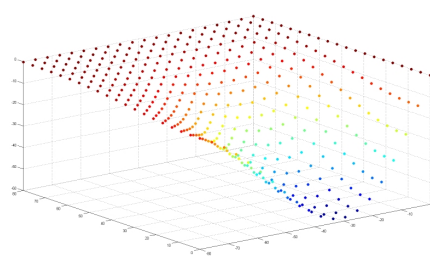
Pro z souřadnice je použita funkce `griddata`.

```
z=griddata(vout(:,1),vout(:,2),vout(:,3),x,y);
```

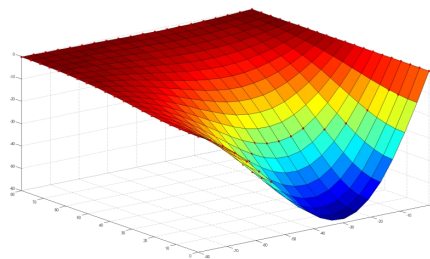
Tato funkce provede interpolaci z souřadnic v návaznosti na vytvořené matice **X**, **Y**, tj. proloží úsečky s danou roztečí z matic **X** a **Y**. Výsledné souřadnice opět zapíše do matice **Z**. Na následujícím obrázku 4.1 je zobrazen převod importovaných dat (bodů), případně trojúhelníkové sítě do mnohoúhelníkové sítě.



(a) Načtený 3D model z STL dat (trojúhelníková síť)



(b) Načtená matice bodů – **V** z STL dat



(c) Importovaný STL formát do Matlabu – převod na polygonální síť

Obrázek 4.1: Postup načtení 3D modelu z STL dat do programu Matlab

S takto definovanou plochou lze následně pracovat v prostředí Matlab a je možné ji využít po následující výpočet geometrických parametrů dané plochy.

4.2 Matematický popis jednotlivých geometrických parametrů ploch

K výpočtu všech potřebných geometrických parametrů obecných ploch je nutné provést výpočty normálového vektoru až po výpočet křivostí [19, 35].

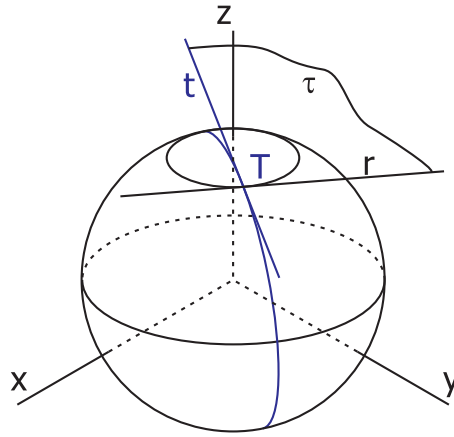
4.2.1 Výpočet normálového vektoru plochy

Obecná forma plochy prostoru je zapsána v parametrické definici následovně:

$$S(u, v) = [x(u, v); y(u, v); z(u, v)] \quad (4.1)$$

K výpočtu jednotkového normálového vektoru plochy je nutné provést výpočet tečné roviny plochy. Následně lze spočítat požadovaný normálový vektor plochy. Jeho výpočet je přímka kolmá na tečnou rovinu viz rovnice 4.5.

Pokud tečny všech křivek k_i tvoří rovinu τ , pak bod T nazveme regulárním bodem plochy a rovinu τ , tečnou rovinu plochy, viz obrázek 4.2.



Obrázek 4.2: Rovina plochy s tečnou křivky

Tečná rovina τ v bodě T je:

$$\tau(u, v) \equiv T + u\mathbf{t} + v\mathbf{r} \quad (4.2)$$

$$\mathbf{t} = \left(\frac{\partial x}{\partial u}; \frac{\partial y}{\partial u}; \frac{\partial z}{\partial u} \right) \quad (4.3)$$

$$\mathbf{r} = \left(\frac{\partial x}{\partial v}; \frac{\partial y}{\partial v}; \frac{\partial z}{\partial v} \right) \quad (4.4)$$

Vlastní normála plochy se pak vypočítá:

$$\mathbf{n} = \mathbf{t} \times \mathbf{r} \quad (4.5)$$

Tyto geometrické parametry jsou následně důležité pro výpočet křivostí plochy (hlavní, střední a Gaussovu křivost).

4.2.2 Výpočet hlavní křivosti plochy

Pro vlastní výpočet křivosti plochy je nutné nejprve provést popis základních forem plochy a to:

Výpočet první základní formy plochy Φ_1

První základní forma plochy nám umožňuje vypočítat některé vlastností plochy, které nejsou závislé na přesné pozici plochy v souřadném systému tj. úhly a velikosti vektorů na dané ploše [19, 35].

Křivka na ploše má parametrické vyjádření: $K(t) = S(u(t), v(t))$

Tečný vektor křivky $\mathbf{k}(t)$ je spočítán parciální derivací křivky $K(t)$:

$$\frac{dK(t)}{dt} = \frac{\partial S(u(t), v(t))}{\partial u} \frac{du(t)}{dt} + \frac{\partial S(u(t), v(t))}{\partial v} \frac{dv(t)}{dt} \quad (4.6)$$

První základní forma plochy:

$$\Phi_1 = \frac{dK(t)}{dt} \frac{dK(t)}{dt} = \frac{\partial S}{\partial u} \frac{\partial S}{\partial u} (du)^2 + 2 \frac{\partial S}{\partial u} \frac{\partial S}{\partial v} (du dv) + \frac{\partial S}{\partial v} \frac{\partial S}{\partial v} (dv)^2 \quad (4.7)$$

$$\Phi_1 = E(du)^2 + 2F du dv + G(dv)^2 \quad (4.8)$$

$$E = \frac{\partial S}{\partial u} \frac{\partial S}{\partial u} = \frac{\partial^2 S}{\partial u^2} \quad (4.9)$$

$$F = \frac{\partial S}{\partial u} \frac{\partial S}{\partial v} \quad (4.10)$$

$$G = \frac{\partial S}{\partial v} \frac{\partial S}{\partial v} = \frac{\partial^2 S}{\partial v^2} \quad (4.11)$$

Výpočet druhé základní formy plochy Φ_2

Tato forma plochy nám umožňuje vypočítat vnitřní geometrii plochy, tj. geometrické parametry jako je střední či hlavní křivost dané plochy.

Křivka na ploše je parametrizována obloukem $K(t) = S(u(t), v(t))$. Tečný vektor křivky $\mathbf{k}(t)$ je opět spočítán parciální derivací:

$$\frac{dK(t)}{dt} = \frac{\partial S(u(t), v(t))}{\partial u} \frac{du(t)}{dt} + \frac{\partial S(u(t), v(t))}{\partial v} \frac{dv(t)}{dt} \quad (4.12)$$

$$\frac{d^2 K(t)}{dt^2} = \frac{\partial^2 S}{\partial u^2} \left(\frac{du}{dt} \right)^2 + 2 \frac{\partial^2 S}{\partial u \partial v} \frac{du}{dt} \frac{dv}{dt} + \frac{\partial^2 S}{\partial v^2} \left(\frac{dv}{dt} \right)^2 + \frac{\partial S}{\partial u} \frac{d^2 u}{dt^2} + \frac{\partial S}{\partial v} \frac{d^2 v}{dt^2} \quad (4.13)$$

Normálová křivost křivky v daném bodě je:

$$\mathbf{k}_n = \frac{d^2 K(t)}{dt^2} \mathbf{n}, \quad (4.14)$$

kde \mathbf{n} je normála plochy.

$$\Phi_2 = L du^2 + 2M du dv dv^2 \quad (4.15)$$

$$L = \frac{\partial^2 S}{\partial u^2} \mathbf{n} \quad (4.16)$$

$$M = \frac{\partial^2 S}{\partial u \partial v} \mathbf{n} \quad (4.17)$$

$$N = \frac{\partial^2 S}{\partial v^2} \mathbf{n} \quad (4.18)$$

Tyto rovnice jsou základní veličiny druhého řádu a pomohou při výpočtu jednotlivých křivostí plochy. Hlavní směry plochy nám umožní zjistit směry, ve kterých normálová křivost nabývá extrémních hodnot (K_{max}, K_{min}).

4.2.3 Výpočet Gaussovy křivosti plochy

Z výše uvedených vzorců 4.16, 4.17, 4.18 lze následně spočítat Gaussovu křivost [19, 35]:

$$K = \frac{LN - M^2}{EG - F^2} = K_{min} K_{max} \quad (4.19)$$

4.2.4 Výpočet střední křivosti plochy

Z výše uvedených vzorců 4.9, 4.10, 4.11, 4.16 4.18, 4.17 lze následně spočítat střední křivost [19, 35]:

$$H = \frac{NE - 2MF + LG}{2(EG - F^2)} = \frac{K_{max} + K_{min}}{2} \quad (4.20)$$

4.2.5 Výpočet absolutní, minimální a maximální křivosti plochy

Z výše uvedených vzorců 4.19, 4.20 lze následně spočítat absolutní křivost plochy [19, 35]:

$$K_{abs} = |K_{max}| + |K_{min}| \quad (4.21)$$

$$K_{min} = H + \sqrt{H^2 - K} \quad (4.22)$$

$$K_{max} = H - \sqrt{H^2 - K} \quad (4.23)$$

4.3 Regionalizace bodů plochy na jednotlivé typy

Druhá základní forma plochy nám dává informace ohledně vnitřního uspořádání obecné plochy. Díky výpočtům Gaussovy křivosti a střední křivosti se dají vypočítat jednotlivé typy regulárních bodů, které jsou definovány následovně [14, 22]:

Eliptický bod: V tomto bodě je znaménko křivosti ve všech směrech stejné, takže celá plocha lokálně leží po jedné straně tečné roviny (kladné či záporné, dle klasifikace bodu). Základními příklady jsou typy sfér či elipsoidu. Tedy Gaussova křivost $K > 0$ a K_{max} a K_{min} mají stejné znaménko (kladné či záporné). Zde je nutno rozlišit konvexní eliptický bod a konkávní eliptický bod, rozdíl je ve znaménku K_{max} a K_{min} . Pro konvexní (vypouklý) eliptický bod platí: $K > 0$ a K_{max} a K_{min} jsou záporné, tedy střední křivost $H < 0$. Pro konkávní (vydutý) eliptický bod platí: $K > 0$ a K_{max} a K_{min} jsou kladné, tedy střední křivost $H > 0$.

Hyperbolický bod: V tomto bodě je znaménko maximální a minimální křivosti v jednom směru kladné a v druhém záporné, takže celá plocha leží na obou stranách tečné roviny. Tedy Gaussova křivost $K < 0$ a K_{max} a K_{min} mají různá znaménka (kladná, záporná). Pro hyperbolický bod platí: $K < 0$ a $K_{max} \neq 0$, $K_{min} \neq 0 \rightarrow H \neq 0$.

Parabolický bod: V tomto bodě je znaménko maximální a minimální křivosti v jednom směru nulové a v druhém záporné či kladné, takže celá plocha leží na jedné nebo na obou stranách tečné roviny. Tedy Gaussova křivost $K = 0$ a K_{max} a K_{min} mají různá znaménka (kladná, záporná) a jedno z nich je vždy nulové. Zde je nutno rozlišit konvexní parabolický bod a konkávní parabolický bod, rozdíl je v hodnotách K_{max} a K_{min} . Pro konvexní parabolický bod platí: $K = 0$ a jedna z K_{max} či K_{min} je nulová a druhá záporná, tedy střední křivost $H < 0$. Pro konkávní parabolický bod platí: $K = 0$ a jedna z K_{max} či K_{min} je nulová a druhá kladná, tedy střední křivost $H > 0$.

Rovinný bod (planární bod): U tohoto bodu jsou všechny křivosti nulové, tedy celá plocha leží na rovinné nebo části rovinné plochy. Tedy Gaussova křivost $K = 0$ a střední křivost $H = 0$.

Pro rozdělení obecné plochy na jednotlivé segmenty, lze postupovat v zjednodušeném rozčlenění a to rozdělení na konvexní část, včetně rovinné části (planárních bodů), dále konkávní část a jako poslední sedlovou část plochy (hyperbolické body):

- $K \geq 0$ a $H \leq 0$ plocha má konvexní tvar,
- $K \geq 0$ a $H > 0$ plocha má konkávní tvar,
- $K < 0$ a $H \neq 0$ plocha má tvar sedla.

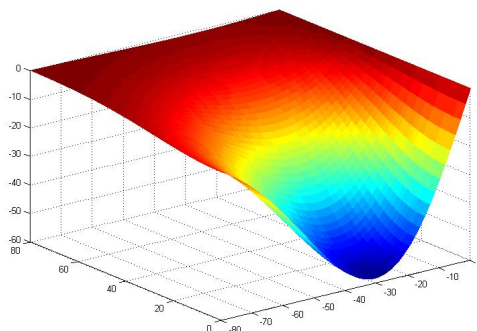
Tyto výpočty umožňují relativně rychle získat veškeré podrobné informace o tvaru plochy, které se použijí pro rozdělení na jednotlivé regiony a informace o hlavní křivosti a normály plochy pro řízení pohybů vlastního nástroje při obrábění takto rozdělené plochy.

K ověření výpočtů jsou vypočítány křivosti z analyticky zadané plochy a STL plochy. Tento výpočet slouží k následnému porovnání takto popsané analytické plochy k zpracovávaným STL datům. Zvolený postup slouží nejen k ověření funkčnosti

představovaného algoritmu, ale i k ověření s jakou přesností lze zpracovávat externí STL formát.

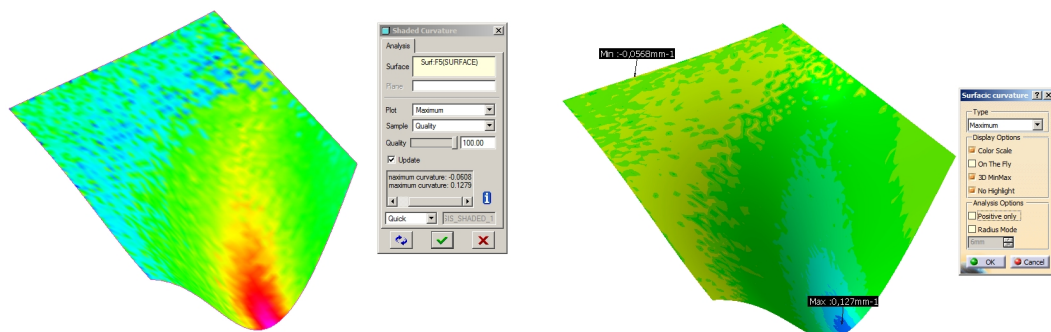
Analyticky zadaná plocha 4.24, která je zobrazena na obrázku 4.3, slouží pro ověření algoritmu a matematického výpočtu všech křivostí [15].

$$z = \frac{2}{e^{(x-5)^2+y^2}} - \frac{2}{e^{(x+5)^2+y^2}} \quad (4.24)$$



Obrázek 4.3: Ukázka analytické plochy v prostředí Matlab

Při analytickém výpočtu daných křivostí v programu Matlab získáme tuto hodnotu $K_{\max} = 0,125$. Zobrazená barevná mapa na obrázku 4.3 neodpovídá hodnotám křivosti, ale zobrazuje úroveň hodnot z . V CAD systémech, Pro/E získáme $K_{\max} = 0,1279$, viz obrázek 4.4a, Catia $K_{\max} = 0,127$, viz obrázek 4.4b. Tyto hodnoty jsou získány z dostupných analýz v jednotlivých programech.



(a) Analýza plochy v programu Pro/E, včetně křivosti K_{\max}

(b) Analýza plochy v programu Catia, včetně křivosti K_{\max}

Obrázek 4.4: Ukázka analytické plochy v prostředí CAD programů

Bohužel CAD program Catia nemá možnost analýzy střední křivosti, která je důležitá pro rozdělení jednotlivých bodů do různých oblastí. Jediné, co lze z těchto CAD programů (Pro/E, Catia) získat, je vlastní hodnota dané křivosti. Nikoliv však provést automatické rozdělení dle potřebných parametrů. Dle výše popsaným výpočtům lze následně provést rozdělení obecné plochy na potřebné jednotlivé elementy tak, aby vlastní obrábění těchto částí probíhalo separátně různými nástroji. S využitím této úpravy je možné získat produktivnější obrábění dané plochy.

4.4 Definování hranic dílčích částí obecné plochy

K vlastní analýze rozdělení plochy byl vytvořen program v prostředí Matlab, který provádí rozdělení načtené – importované obecné plochy, a určí potřebné hranice podle velikosti křivosti. Importovaná plocha je ve formátu STL. Vlastní zpracování a tvorba obecných ploch je prováděna v CAD/CAM programu Pro/Engineer WildFire 4.0. Virtuální simulace obrábění je vytvořena v CAD/CAM systému EdgeCAM. Obecná plocha je rozdělena do několika částí a to tvar vypouklý, vydutý a tvar sedla. Toto rozdělení je možné použít díky výpočtu všech křivostí zkoumané plochy. Pro přesné definování jednotlivých hraničních částí těchto oblastí je potřebné určit hranice „plátů“ (patches). Využívá se *Fuzzy metoda* (*Fuzzy k* – středové shlukování), která pro každý bod počítá s jakou pravděpodobností patří do jaké množiny bodů (plátu). To znamená, že body na okraji množiny, plátu (shluku), mají menší stupeň příslušnosti (váhu) než body ve středu daného plátu a tím lze dobře popsat rozložení objektů v dané části plátu. Jednotlivé hranice těchto plátů jsou následně nalezeny pomocí *Voronoi diagramu*. Tento diagram spočítá hledané hranice plátů. Představuje tedy rozklad dané množiny bodů na definovaný počet uzavřených či otevřených oblastí (plátů) a to takových, že každý zkoumaný bod je blíže k danému bodu z plátu než k jakémukoliv bodu z jiného plátu. Výhodou této metody je rozdělení komplikovaných tvarů ploch na jednotlivé segmenty s obdobnými vlastnostmi a ty následně výhodně obrobit na 3osém CNC stroji, který je vybaven přídatným naklápěním a otočným stolem [7].

V další odborné publikaci popisuje *Roman* s jeho kolegy [23], že využívá stejnou metodu pro rozdělení plochy na jednotlivé části jako *Chen* [4], avšak ke každému geometrickému parametru (Gausova křivost, střední křivost a normálová křivost) přidávají určitou váhu k výběru, která se promítne na lepším a úspornějším uspořádáním výsledných rozdělených ploch na jednotlivé pláty. Výsledné rozdělení těchto plátů je možné ovlivnit zadanými parametry [23, 24].

Je důležité zmínit, že následně využívané postupy zpracovávající geometrické parametry ploch jsou použity z prací mnoha odborníků, kteří se touto problematikou zabývají. Výše popsané postupy jsou složité a na komplikované tvary ploch nedostačující či jsou přímo neefektivní.

Tato práce představuje upravenou jednoduchou a zároveň účinnou metodu na rozdělení komplikovaných tvarů obecných ploch na jednotlivé segmenty. V této metodě je opět využíváno geometrického popisu plochy včetně matematického rozdělení do výše zmíněných segmentů. K definování hranic jsem vycházel z práce Dr. Tuonga [31]. Pro definování hranic je použita metoda řetězového kódování, které se používá při zpracování obrazu [12]. Hlavní předností zde vytvořené metody je možnost načítání i jinak definovaných ploch než analyticky tj. schopnost načíst externí data a následně je zpracovat. Takto použitý výstup lze případně přímo aplikovat do systému CAD/CAM.

4.5 Rozdělení obecné plochy

Díky geometrickým parametrům dané plochy lze provést rozdělení zkoumané plochy na jednotlivé segmenty. Tyto segmenty obsahují body se stejnými charakteristickými rysy. Jak je výše popsáno, je následně výhodné tyto části ploch obrábět samostatně s využitím různých nástrojů a strategií. V této disertační práci je zkoumaná obecná plocha rozdělena na konvexní, konkávní a sedlovou část. Vlastní rozdělení je dle výpočtu Gaussovy a střední křivosti dané plochy. Postup zpracování dat pro rozdělení obecné plochy:

- popis obecné plochy (načtení STL souboru),
- převedení obecné plochy do (u, v) souřadnic (plátů) a získání množiny řídicích bodů sítě (*grid points*),
- vlastní výpočet Gaussovy, střední a hlavní křivosti každého bodu sítě,
- vyhledání všech sousedních bodů se stejnými charakteristickými vlastnostmi a jejich vlastní rozdělení na část konkávní a sedlovou pro vytvoření příslušné vyduť a sedlové části. Zbývající část konvexních bodů vytvoří tzv. vypouklé oblasti a to včetně rovin.

4.5.1 Popis algoritmu na rozdělení načtené plochy

Algoritmus byl vytvořený v programu Matlab. Zde je popsána podstatná část použitých postupů z předchozích kapitol 4.1 a 4.2.

1. *Vstup do programu:* obecná plocha ve formátu STL. Jedná se o trojúhelníkovou síť, kde každý trojúhelník je popsán třemi body a normálou. Vlastní popis algoritmu je uveden v následující kapitole a to včetně potřebného převodu na plochu UV.
2. *Výstup z programu:* výstupem je několik množin bodů, které jsou rozděleny do jednotlivých typů: konkávní, konvexní, sedlové a rovinné části. Takto zpracované body jsou uloženy do externího souboru, který je následně načten do příslušného CAD/CAM systému.
3. *Začátek programu:*
 - (a) Načti body popisující obecnou plochu. Vytvoř síť bodů p_{ij} a ulož ji do matice \mathbf{M} .
 - (b) Vypočítej Gaussovu K , střední H a maximální K_{max} křivost veškerých bodů p_{ij} z matice \mathbf{M} .
 - (c) Rozděl body p_{ij} matice \mathbf{M} , dle níže popsaných kritérií a zapiš je to příslušných matic \mathbf{M}_1 až \mathbf{M}_3 . Když $K \geq 0$ a $H > 0$ vypočteného bodu, potom ulož bod do matice \mathbf{M}_1 – datová matice tvořena z konkávních

bodů. Když $K \geq 0$ a $H \leq 0$ vypočteného bodu, potom ulož bod do matice \mathbf{M}_2 – datová matice tvořena z konvexních a rovinných bodů. Když $K < 0$ vypočteného bodu potom, ulož bod do matice \mathbf{M}_3 – datová matice tvořena ze sedlových bodů.

(d) Všechny předchozí operace opakuj pro veškeré body základní matice \mathbf{M} .

4. *Konec programu*

Matice \mathbf{M}_1 až \mathbf{M}_3 mají stejnou velikost jako matice \mathbf{M} a to z důvodu následného výhodnějšího zpracování vypočtených hodnot. Tento postup je zabezpečen dle následného rozdělení. Pokud je bod p_{ij} již obsažen v matici \mathbf{M}_1 je na jeho pozici v ostatních maticích \mathbf{M}_2 a \mathbf{M}_3 uvedeno číslo 0, viz tabulky 4.1. Díky tomu lze určit pozici odpovídajícího bodu na dané ploše v souřadnicích (u, v) .

Tabulka 4.1: Částečné matice \mathbf{M} až \mathbf{M}_3

(a) Matice \mathbf{M}

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	3	3	3	2	2	2	2
3	3	3	1	3	3	2	2	2	2
3	3	1	1	1	3	2	2	2	2

(b) Matice \mathbf{M}_1

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	1	1	1	0	0	0	0	0

(c) Matice \mathbf{M}_2

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	2	2	2	2
0	0	0	0	0	0	2	2	2	2
0	0	0	0	0	0	2	2	2	2
0	0	0	0	0	0	2	2	2	2
0	0	0	0	0	0	2	2	2	2
0	0	0	0	0	0	2	2	2	2
0	0	0	0	0	0	2	2	2	2
0	0	0	0	0	0	2	2	2	2
0	0	0	0	0	0	2	2	2	2

(d) Matice \mathbf{M}_3

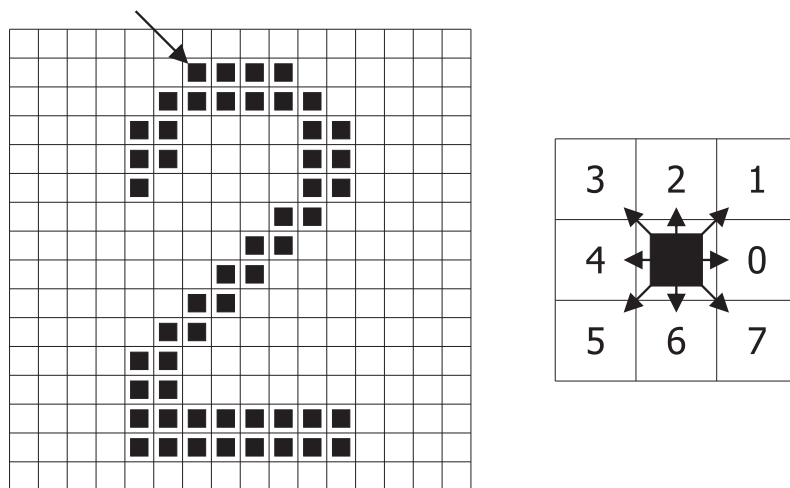
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	0	0	0	0
3	3	3	3	3	3	0	0	0	0
3	3	3	0	3	3	0	0	0	0
3	3	0	0	0	3	0	0	0	0

4.5.2 Určení hraničních částí bodů rozdělené plochy

V předchozí kapitole je popsán postup na rozdělení dané plochy na jednotlivé „pláty“. Nyní je nezbytné určit vlastní hranice těchto „plátů“. Výstupem řešeného postupu musí být informace o dané hranici (množina bodů – prostorová křivka), která je použitelná v CAD/CAM systému pro vlastní rozdělení obecné plochy. Jedním z mnoha řešení je využití matice bodů \mathbf{M} a matic (\mathbf{M}_1 až \mathbf{M}_3) s množinou bodů rozdělených dle předepsaného kritéria. K výpočtu hranice jsou použity metody zpracování obrazu – detekce hran (popis hraničních částí obrazu – *Freemanův řetězový kód* [21]).

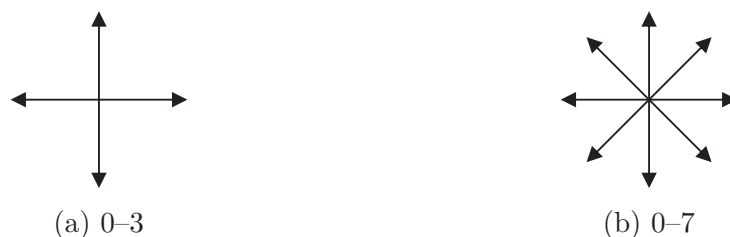
Řetězové kódy

Tyto kódy se používají k popisu hranice objektu. V tomto případě se jedná o popsání hranice rozdělených „plátů“. K popisu celého obrazu používají přístup po tzv. řádcích (provádí se kódování celého objektu po úsecích řádků). Hranice zkoumaného objektu je definována řadou spojených posloupných přímých částí se specifikovanou délkou a směrem, viz obrázek 4.5. Řetězový kód je přírůstkový. Výhodou této metody je možnost zpětné rekonstrukce objektu a nezávislost na posunutí. Nevýhodou je nutnost definovat vždy stejné počáteční místo popisu daného objektu. Přestože, existuje řada praktických použitelných metod popisu tvaru, nebyla dosud vytvořena obecná metodika. Dosavadní postupy mají klady i zápory [21, 28].



Obrázek 4.5: Příklad řetězového kódu pro variantu 0–7. Kde výstupní informace je 0000776655555566000000644444442221111112234445652211

Díky využití Freemanova řetězového kódu lze hranice oblastí určit počátečním bodem a posloupností symbolů, které odpovídají úsečkám jednotkové délky. Postup při tvorbě řetězového kódu je následující: sousedi daného pixelu jsou číslovány od 0 do 7 (případně od 0 do 3), dle použitého kódování. Ve vlastním řetězci je následně zapsáno číslo dalšího sousedního pixelu v daném řádku. Obrázek 4.6 zobrazuje možné směry popisu objektů pomocí řetězového kódu 0–3 a 0–7. Pokud se zvolí režim pro 0 až 7 je daná hranice oblastí rozpoznána s vyšší přesností.



Obrázek 4.6: Příklad řetězového kódu pro variantu 0-3 a 0-7

Struktura zápisu vlastního algoritmu pro detekování dané hranice je sled celých čísel a je definována následovně:

$$c = \{c(0), c(1), \dots, c(n-1)\} \quad (4.25)$$

Důležitým parametrem je definování dané spojitosti – volba režimu rozpoznání pro následující pixel – buď 0-7 nebo 0-3. Ve výrazu je c označeno jako délka řetězového kódu. Algoritmus skládá ze všech jednotlivých elementů řady čísel, které jsou nutné k popsání dané hranice objektu, viz obrázek 4.5. Prvek s označením $c(0)$ je výchozí bod a bod $c(n-1)$ je konečný bod rozpoznaného objektu. První prvek v řadě $c(0)$ je nazýván výchozím bodem, poslední prvek $c(n-1)$ je nazýván konečným bodem kódu.

Zkoumaná plocha je rozdělena do několika oblastí (matic – \mathbf{M}_x). Tyto oblasti jsou popsány jako konvexní či rovinné body matice, dále konkávní a v poslední matici jsou umístěny body se sedlovým charakterem. Je tedy možné dané matice využít jako předlohu hledaných hraničních bodů – částí. Tento algoritmus lze tedy s výhodou použít pro problematiku určení hranic.

Algoritmus pro hledání hranic načtené plochy

Výše popsaný algoritmus (funkce) využívá **Image Processing toolbox** (balíček) v prostředí Matlab. Tento balíček rozšiřuje základní možnosti programu Matlabu o zpracování digitálního obrazu. Jednou z matematických funkcí tohoto balíčku je funkce **boundaries** tzv. hranice. Tato funkce umožňuje, dle Freemanova řetězového kódu, vyhledat hranice objektů v digitálním obrazu [7]. Princip je ve sledování vnější hranice objektu daného obrazu dle pixelů, které obsahují hodnotu 0. Zápis funkce v prostředí Matlab je následující [15]:

B = boundaries(BW, CONN, DIR)

Kde BW obsahuje matici zkoumaného binárního obrazu – „pláty“. Parametr CONN určuje, jakým typem kódování se bude hledat sousední pixel a to buď 4 či 8 (tj. zda se využije 4 či 8 směrů pro oblast hledání). Standardně je tato hodnota nastavena na 8. Poslední parametr DIR označuje směr hledání následujícího pixelu dané hranice. Pokud použijeme CW (standard), následující pixel dané hranice je hledán ve směru hodinových ruček. CCW označuje směr hledání následujícího pixelu protisměru hodinových ručiček. Výstupem funkce B je pole prvků. Každý z prvků obsahuje matici, kde jsou uloženy indexy (pozice) souřadnic hledaných hraničních bodů objektů 4.7.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0	0
0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0
0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0
0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0
0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0
0	0	0	0	0	2	2	2	2	2	2	2	2	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Obrázek 4.7: Ukázka rozložení matice \mathbf{M}_2 , hledání hraničních bodů

Tento popisovaný algoritmus je postupně využit pro všechny vstupní matice (\mathbf{M}_1 , \mathbf{M}_2 , \mathbf{M}_3). Matice obsahují hodnoty 0 nebo čísla 1, 2, 3 a to dle typu regionu (konkávní, konvexní, sedlové). Vnitřní číselné uspořádání matic (\mathbf{M}_1 až \mathbf{M}_3) je důležité pro rozpoznání jednotlivých lokálních částí plochy (vstupní plocha může obsahovat více stejných oblastí např. několik sedel). Výstupem celého početního algoritmu jsou pole \mathbf{Pb}_1 – \mathbf{Pb}_3 , které obsahují matice. Počet matic v daném poli určuje i počet rozpoznávaných stejných typů oblastí. Jednotlivé matice dále obsahují souřadnice x, y, z hraničních bodů oblastí.

K získání přesných hraničních křivek řešených oblastí je využit CAD/CAM systém. V této disertační práci je použit Pro/Engineer WildFire 4.0. Tento sw umožňuje načtením mraku bodů a proložením těchto bodů na danou plochu získat požadované hraniční body a následně křivky. Díky tomuto postupu lze získat požadované přesné hraniční křivky všech skupin, které slouží k rozdělení vstupní plochy na jednotlivé pláty.

4.6 Výpočet lokálních křivostí jednotlivých plátů a kontrola kolizí

Základní myšlenkou k zamezení kolizi při obrábění obecných ploch je, že u nástroje s kulovým zakončením nedojde k lokálnímu podříznutí dané plochy za předpokladu, že je poloměr nástroje menší než je poloměr zakřivení obráběné plochy v okolí kontaktního bodu (*CC – Cutter Contact*) nástroje. Pokud se využívá jiný typ nástroje než je kulového typu např. válcového či se zaoblenou hranou je nutné opět dodržet poloměr nástroje, který je menší než nejmenší poloměr zakřivení dané části obecné plochy – plátu [8, 10, 12, 18].

4.6.1 Výpočet lokálních křivostí jednotlivých oblastí

Pro výpočet největšího použitelného průměru nástroje je nutné vypočítat či znát největší křivost na dané ploše. Tento výpočet lze provést z rovnice 1.1 a 1.2, kde je uveden vztah pro získání největšího průměru nástroje pro obrábění dané části plochy.

Ke specifikaci křivosti lze použít dvou postupů:

- v CAD/CAM systémech lze provádět geometrické analýzy jednotlivých ploch. Analýze umožní zobrazit maximální křivost dané plochy. Bohužel pokud se jedná o velice komplikované tvary obecných ploch, dochází k určitým nepřesnostem při výpočtu křivosti. Na obrázku 4.4a je zobrazena maximální křivost zkoumané obecné plochy v programu Pro/E. Na obrázku 4.4b zobrazena plocha v programu Catia. Z této hodnoty křivosti dle vztahu 1.1 je možno vypočítat maximální možný použitelný poloměr nástroje s kulovým zakončením, který lze využít pro obrábění. Získané hodnoty pro jednoduché plochy se mnoho neliší.
- V programu Matlab lze vypočítat hlavní křivosti K_{min} a K_{max} ve všech zkoumaných bodech. Následně jsou tyto hodnoty uloženy do matice. Z této matice se vybere maximální hodnota ze všech křivosti K_{max} , díky které se opět ze vztahu 1.1 vypočítá maximální poloměr nástroje s kulovým zakončením.

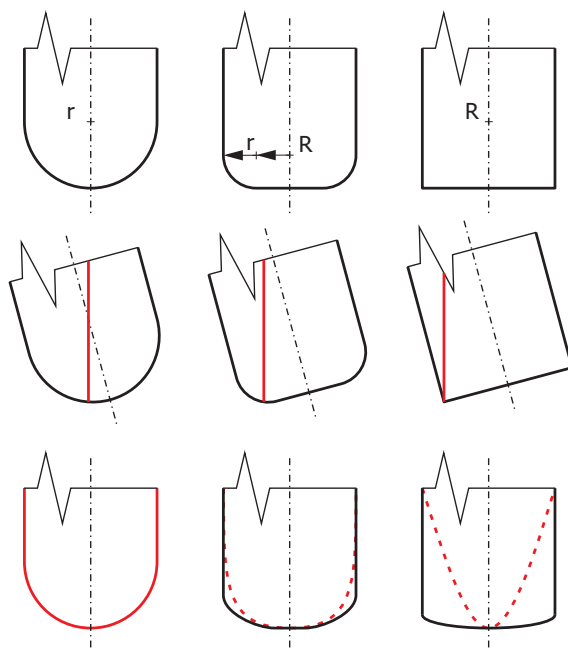
V případě, že obecná plocha obsahuje více oblastí např. několik sedel, je maximální a minimální křivost získávána ze všech oblastí. Pokud chceme získat maximální či minimální křivosti jednotlivých daných oblastí, je nutné provést další matematické operace. První operací je číselné označení všech jednotlivých oblastí v matici např. sedlové. Tato operace je provedena pomocí funkce `bwlabel` [15]. Výstupem této funkce je matice, která obsahuje veškeré oblasti pod různými čísly. Dále podle velikosti získané oblasti se dle parametru `detekovana_oblast` rozhodne, zda se u této oblasti bude vypočítávat minimální a maximální křivost.

Zajímavým zjištěním bylo, že pro jednoduché části ploch se křivosti z CAD programů a programu Matlab pohybovaly ve stejných řádech. Při použití komplikovaných ploch došlo k nečekaným a nesmyslným hodnotám při výpočtu v programů Pro/E, Catia. Bohužel není znám postup výpočtů křivosti plochy v CAD programech. Tento stav odpovídá pravděpodobně nedostatečnému matematickému výpočtu dané křivosti v CAD programech.

4.6.2 Kontrola kolizních stavů

Při obrábění obecných ploch může dojít k lokálnímu podříznutí. V krajních případech dojde k celkové kolizi. Při obrábění nástroj provede podříznutí obráběné plochy – kolize či zaříznutím do upínek. Lokální podříznutí vzniká za předpokladu při použití většího poloměru kulového nástroje než je převrácená hodnota křivosti dané lokální plochy viz rovnice 1.1. Další možný kolizní stav může vzniknout při výběru jiného nástroje než kulového a to včetně nastavení různých úhlů náklonu a vlečení. V důsledku toho je vlastní profil nástroje, který je v kontaktu s plochou jiný než je

vlastní geometrie nástroje, viz obrázek 4.8. Pro tyto typy nástrojů je nutné kontrolovat kolize i v lokálních obráběných plochách tak, aby nedošlo k podřezání u dané plochy.

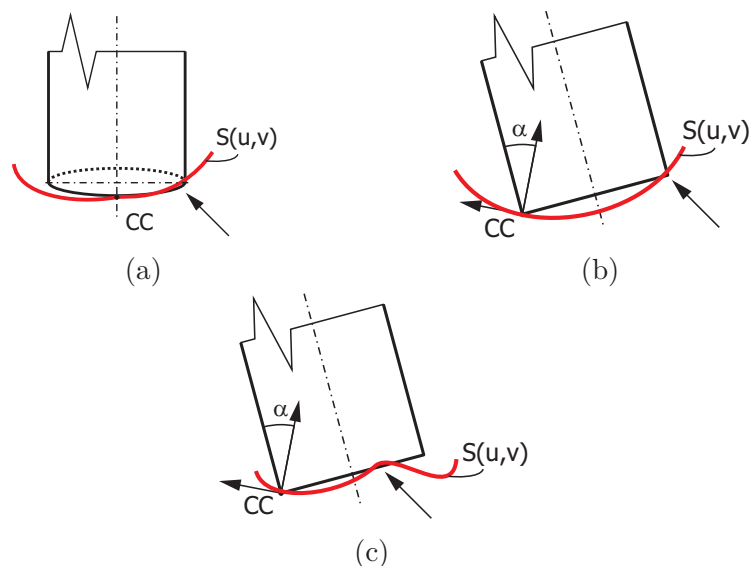


Obrázek 4.8: Skutečné profily jednotlivých frézovacích nástrojů dle použitého náklonu vůči obráběné ploše jsou zvýrazněny červeně

Řada odborných prací [20, 10] se věnuje problému vyhledávání dané kolize a jejímu zabránění. Zabývají se porovnáním efektivní křivosti užitého nástroje pro obrábění daného povrchu vůči lokální křivosti plochy, po které se nástroj pohybuje. Typy těchto kolizí jsou zobrazeny na obrázku 4.9. Jiné přístupy používají metody *Paul Gray* [6], která využívá principu „tažení koule“ – (rolling ball method), po daném povrchu, nebo *Hosseinkhaniho metoda* [7] pro zamezení průniků, která hledá řešení v různém na polohování nástroje, tak aby nedošlo k danému podříznutí obráběné plochy

Bylo vyvinuto i několik speciálních metod k nalezení (detekci) a zamezení podřezání pro 5osé aplikace. *Lee a Chang* [12, 13] navrhli dvoustupňové řešení, kde v první části byl prováděn výpočet na nalezení vhodné polohy (orientace, natočení) nástroje s využitím kontrolních bodů sítě. V druhé části se následně hledala vlastní kolize s využitím přesných dat obráběné plochy. Hlavní kolizi, která vzniká chybným nastavením úhlů pro vedení a vlečení nástroje (úhel náklonu a boční úhel), lze eliminovat vhodným nastavením těchto úhlů. Dle odborné literatury [12, 13] je možné nastavit polohu těchto úhlů dle následujících předpisů:

- přímým nastavením daného úhlu,
- výpočtem vhodných rozsahů všech úhlů, včetně směrů ve všech kontaktních bodech na ploše.



Obrázek 4.9: Typy možného lokálního podříznutí

Nevýhodou první varianty řešení je, že pokud nastavený úhel není vhodný, je nutné provést korekci parametrů a celý výpočet opakovat. Tato operace se provádí tak dlouho, dokud není nalezeno vhodné řešení. Tento princip je jednoduchý, ale časově náročný a nenabídne nejvhodnější (optimální) řešení. Druhá varianta tyto nedostatky minimalizuje, ale je velice obtížné metodu prakticky uskutečnit a aplikovat. Důvodem je, že způsobená hlavní kolize je závislá na průměru nástroje, včetně jeho délky a také rozměrů držáku nástroje.

Dnešní CAD/CAM systémy umožňují v simulátorech obrábění zobrazit i případné kolize. V sw EdgeCAM lze pracovat v grafickém prostředí simulátoru obrábění s 3D modelem obráběcího stroje a to i včetně 3D modelu využívaných nástrojů. Případná kolize nástroje vůči obrobku či částem stroje (kryty) je zobrazena grafickým výstupem. Tato oblast je označena červeným podbarvením a to včetně místa kolize. Díky těmto zobrazením lze relativně rychle provést potřebné úpravy parametrů tak, aby následně už k dané kolizi nedošlo.

Při vlastním 5osém obrábění lze v sw EdgeCAM označit tzv. „chráněné plochy“ [34]. Tyto plochy jsou následně kontrolovány vůči kolizi a to pro samotný nástroj či nástroj s držákem. Obrábění takto rozdělené plochy do jednotlivých částí (konvexní, sedlo, konkávní) lze kontrolovat (měnit parametry) kolize zvlášť v jednotlivých částech řešené plochy.

Pro efektivní odstranění případné kolize jsou dva postupy:

1. Zvolit optimální průměr nástroje pro obrobení dané celé oblasti bez kolize.
2. Vybrat vhodný nástroj a to včetně vlastní orientace (polohování) k obrábění jednotlivých částí obecné plochy s vyhledáním případných kolizí.

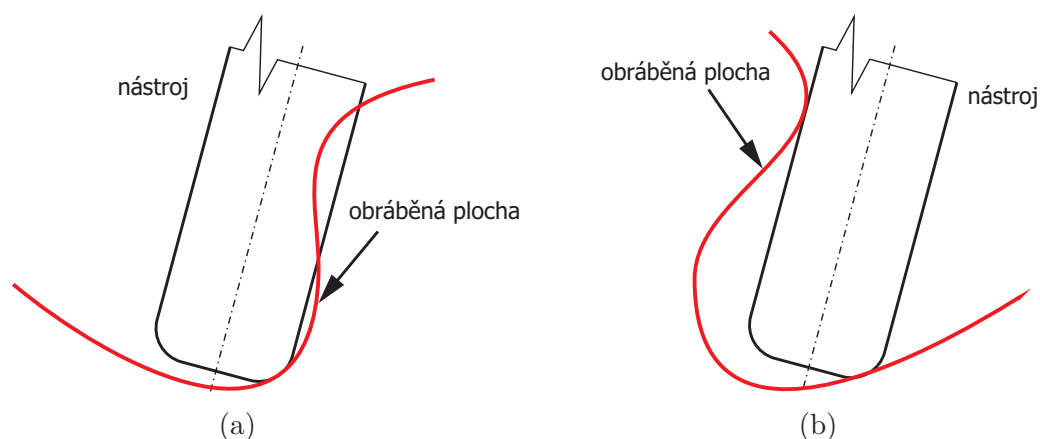
U druhého způsobu oproti prvnímu lze částečně ušetřit čas tvorby dráhy nástrojů v CAM programech díky rozdělení celkové plochy na jednotlivé segmenty. Na každý segment obráběné plochy následně použít nástroj o optimálním průměru. Výsledkem

je kratší délka dráhy nástroje při obrábění těchto segmentů než při kompletním obrobení celé plochy. Dále je zde rychlejší odstranění případných kolizí, protože se řízení nástroje nastavuje jen pro danou část a ne pro celou obráběnou plochu.

4.6.3 Popis možných kolizí nástroje a orientace nástroje v různých směrech

V případě 5osého obrábění obecných ploch, lze použít různé typy zakončení nástrojů (kulové, válcové či se zaobleným rohem) zobrazené na obrázku 4.9. Při vlastním obrábění rovinných a konvexních oblastí nebývá problém s případnou kolizí. Avšak při obrábění konkávních a sedlových částí, musí být splněna již výše zmíněná podmínka: tj. musí být efektivní poloměr nástroje menší než minimální poloměr zakřivení části obráběné plochy. I přesto bohužel může dojít k následujícím kolizím, jak je vidět na obrázku 4.10:

- obrábění konkávní plochy, kde v blízkosti je jiná konvexní plocha, která přesahuje do válcového dřívku nástroje či držáku, viz obrázek 4.10a,
- obrábění konvexní plochy, kde v blízkosti jsou jiné či částečně zasahující (propojené) sedlové či konvexní části dalších ploch, viz obrázek 4.10b.



Obrázek 4.10: Typy možného lokálního podříznutí při obrábění – konkávní 4.10a a konvexní 4.10b

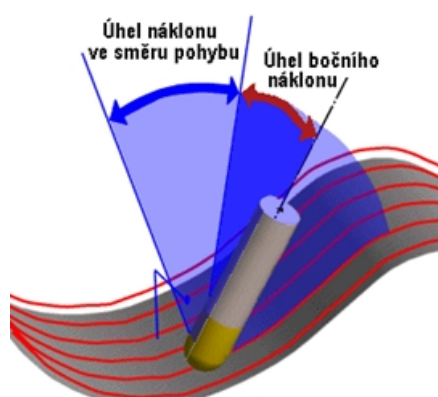
V posledním uvedeném případě, kdy nástroj je opatřen kulovým zakončením, dochází při obrábění konkávní plochy ke kontaktu s konvexní částí další plochy a tím pádem i ke kolizi – podříznutí. Splnění toho předpokladu ještě závisí na blízkosti sousedících obráběných ploch (konkávní a konvexní), tj. pokud budou plochy blíže než je poloměr nástroje, dojde ke kolizi. Zamezení této kolize lze např. úpravou odklonu osy nástroje vůči normále obráběné lokální plochy – tzv. *úhel odklonu*. V odborné literatuře [8] se doporučuje tento úhel pro kulové zakončení 5° až 10° . V praxi je tento úhel definován jako úhel náklonu ve směru pohybu a úhel bočního náklonu nástroje.

Úhly náklonu a úhel bočního náklonu

Tyto úhly se používají pro řízení nástroje při 5osém obrábění. Oproti 3osému obrábění jsou zde další osy, které se dají řídit. Výhodou 5osého obrábění je, že při obrábění kulovým zakončením nástroje nakloněné frézy, kdy není v záběru střed nástroje, je vyšší produktivita než na 3osé frézce. Bohužel toto obrábění je složitější z důvodu řízení dalších os a nastavení [2, 34].

Úhel náklonu: je definován jako úhel nástroje v rovině směru pohybu nástroje vzhledem k normále obráběného povrchu (obrázek 4.11) [34].

Úhel bočního náklonu: je definován jako úhel nástroje v rovině kolmé na směr pohybu nástroje vzhledem k normále obráběného povrchu (obrázek 4.11) [34].



Obrázek 4.11: Úhel náklonu a odklonu při 5osém obrábění [34]

Hodnoty těchto úhlů mohou být nulové, kladné či záporné. V případě, že bude hodnota obou úhlů nula, je osa nástroje stejná jako normála k dané ploše. Toto nastavení je však nevhodné při použití kulového zakončení stroje, protože tento nástroj má nulovou řeznou rychlost v ose nástroje.

Definování ideálních hodnot pro tyto úhly je velice obtížné, protože to závisí na dané aplikaci. Převážně se tyto úhly určují dle zkušeností programátora či pokusem. Tyto úhly se definují přímo při aplikování 5osého cyklu v CAM programu. V EdgeCAM jsou tyto úhly označovány jako úhel náklonu ve směru pohybu a úhel bočního náklonu nástroje. V praxi se tedy postup volí následovně:

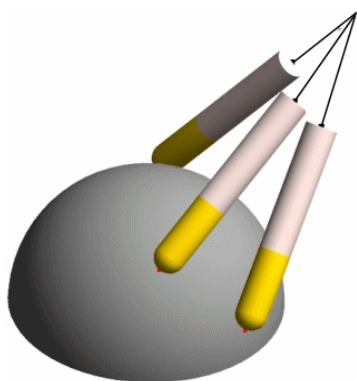
1. načtení obráběné plochy do systému EdgeCAM,
2. aplikování 5osého obráběcího cyklu na danou část plochy,
3. definování základních hodnot obou úhlů pro řízení náklonu nástroje při obrábění dané plochy,
4. zvolení plochy pro obrábění a ploch pro kontrolu kolizí (jak sousední, tak i vlastní obráběnou plochu),

5. simulaci obrábění a zjištění vlastních kolizí,
6. úpravy úhlů, parametrů pro 5osé obrábění, provedení simulace a zjištění chyb.

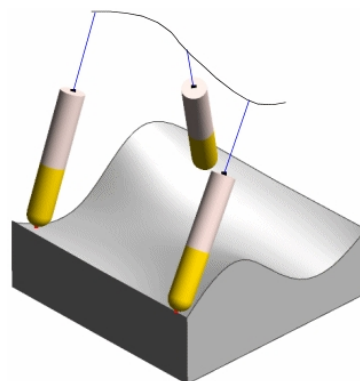
Poslední část je nutné opakovat, dokud není zamezeno koliznímu stavu při obrábění dané části plochy. Bohužel, pokud dojde k obrábění velice hlubokých konkávních tvarů (viz obrázek 4.10a), změna úhlů parametrů je neaplikovatelná. Zde je nutné použít při frézovacím procesu jiné strategie pro vedení nástroje.

Možné využití dalších strategií pro odstranění kolize jsou:

1. Řízení náklonu osy nástroje do pevného bodu – osa nástroje prochází vždy zadaným bodem 4.12a.
2. Řízení náklonu osy nástroje dle řídicí křivky – osa nástroje vždy prochází zadanou křivkou 4.12b.



(a) Vedení nástroje, kdy osa nástroje prochází – bodem



(b) Vedení nástroje, kdy osa nástroje protíná křivku

Obrázek 4.12: Možnosti vedení nástroje v programu EdgeCAM

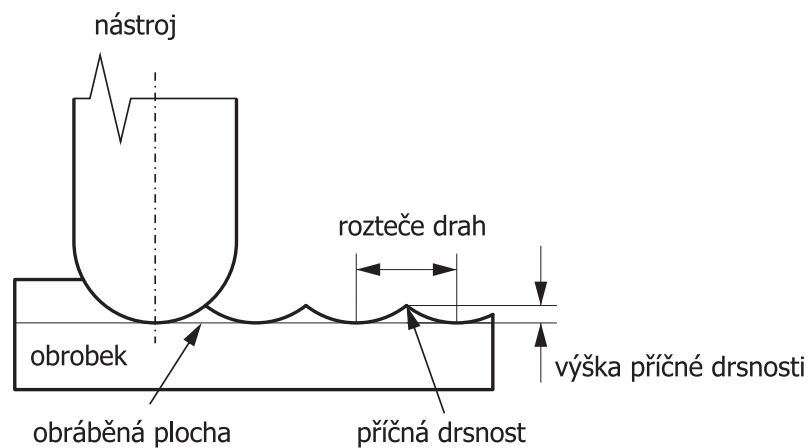
Použití těchto metod je efektivnější při obrábění komplikovaných tvarů ploch a to díky různému nastavení strategií a možnosti použít různé nástroje na různé oblasti [2, 34].

5. Metody generování NC drah nástroje

Dle standardu ISO kódování pro CNC obráběcí centra je vlastní dráha nástroje sérií oblouků a přímek (geometrické funkce G2, G3 či G1). Oproti 3D modelu v CAD/CAM systému tedy vzniká nepřesnost, která je způsobená popisem obráběné obecné plochy. Hlavním cílem obrábění je získat co nejpresnější kopii dílce, který je vytvořen ve 3D systémech, tj. pohybovat se s co nejmenší nepřesností mezi virtuálním modelem a vlastním výrobkem.

Při obrábění obecné plochy se nástroj pohybuje po řadě nástrojových poloh. Tyto polohy připravuje pro vlastní CNC systém (stroj – kinematika, řídicí systém) postprocesor. Postprocesor tvoří vlastní překladač z jazyka CAM systému do jazyka řídicího systému CNC stroje. Následně CNC systém interpoluje dráhu mezi zadanými body, jak se pohybuje vlastní nástroj. Data, která zpracovává postprocesor pro daný CNC systém a stroj se nazývají CL data (*Cutter Location data*). Tyto data obsahují veškeré informace, které jsou potřebné pro vytvoření konkrétního NC programu. V CAM systému nastaví uživatel příslušnou tolerance pro generování dráhy nástroje a tyto tolerance jsou poté promítnuty do výsledných souřadnic v souboru CL daty. V tomto souboru je dále obsažena informace o použitých nástrojích (včetně jejich rozměrů), dále hodnoty posuvových rychlostí, otáčky vřetene a také smysl rotace v neposlední řadě i typ použité interpolace. Např. pro 5osé obrábění jsou tři lineární souřadnice (určující polohu nástroje v prostoru) rozšířeny o další tři reálná čísla, dle kterých je následně určena orientace nástroje v daném prostoru. Vlastně jde o určení jednotlivých složek jednotkového vektoru, který je umístěn v ose nástroje a vychází z referenčního bodu nástroje v každém místě v průběhu dráhy nástroje. Složky jednotkového vektoru jsou poté situovány do souřadného systému umístěného též v referenčním bodě nástroje. Každé místo v průběhu dráhy nástroje a osy tohoto pomyslného souřadného systému jsou rovnoběžné s osami souřadného systému obrobku. Pro generování CL dat jsou užívány komerční CAD/CAM systémy jako EdgeCAM, Pro/E, Catia.

V rámci práce není vyvíjen nový algoritmus pro zpracování CL dat. Pro praktické testy je využit princip konstantní výšky vrcholů stop po nástroji tzv. *výška příčné drsnosti*. Dle odborné literatury a článků se tento parametr nazývá *SH – Scallop Height*. Jedná se o výšku nerovnosti, která je přímo závislá na velikosti vzdálenosti dvou po sobě jdoucích drahách nástroje. Parametr *SH* umožňuje efektivní obrobení obecných ploch a to jak u 3osých i 5osých strojích [3, 5, 39]. Převážné využití tohoto postupu je u 5osého obrábění. Výstupní výšky vrcholů závisí na použitém typu nástroje, rozteče daných drah, ale i typu zakřivení plochy (charakteru). Konečný tvar těchto výstupků je ovlivněn použitým typem nástroje. U 5osého obrábění přímo



Obrázek 5.1: Využití příčné drsnosti při frézování

ovlivňuje nastavení výšky příčné drsnosti, délku dráhy nástroje a celkový čas nutný pro obrobek dle zadaných parametrů. Na obrázku 5.1 je zobrazen detail příčné drsnosti frézovacím nástrojem s kulovým zakončením.

6. Aplikace metody „členění ploch“

V následujících úlohách jsou představeny veškeré nutné kroky k potřebnému rozdělení zadané plochy na jednotlivé pláty včetně vlastního obrábění:

1. Export řešené plochy do formátu STL s využitím programu GOM Inspect V7.5 SR1.
2. Rozdělení obecné plochy na jednotlivé pláty včetně definování potřebných hranic v programu Matlab.
3. Import hraničních křivek do prostřední Pro/E, vlastní rozdělení plochy.
4. Tvorba NC drah nástroje pro každý plát obecné plochy a celkovou obecnou plochu za předpokladu bezkolizní simulace obrábění v programu EdgeCAM či PowerMill.

Výsledkem je vlastní porovnání výhod navrhované metody rozdělení obecné plochy na jednotlivé části a tradičním způsobem obrábění – celistvé plochy. Toto porovnání je z hlediska času, délky drah a použitých nástrojů.

6.1 Postup při generování STL dat s využitím SW GOM Inspect V7.5 SR1

Export řešené plochy do formátu STL umožňují vesměs všechny CAD/CAM programy vyšších tříd (Catia, SolidWorks, Pro/E, Unigraphics, atd.) Je však důležité provést nastavení přesnosti (jemnosti) tvořené sítě. Problematickou částí v sw Pro/E je nemožnost generování STL dat z reverse plochy (mraku bodů). Pokud se jedná o plný model tzv. „solid model“, vlastní software provede generování STL dat. Další možností, jak získat STL dané plochy je generování tohoto datového souboru s využitím sw Catia, kde lze nastavit danými parametry hrubost generované sítě. V případě importování velice hrubého STL souboru může dojít k lokální ztrátě informace o tvaru zkoumané části, což může mít za následek nedostatečné rozpoznání jednotlivých částí plochy. Bohužel při využití sw Catia pro generování STL souboru bylo zjištěno u velmi komplikovaných ploch nedostatečné rozpoznání dané hranice. Proto byl u všech řešených ploch využit volně dostupný sw GOM Inspect V7.5. Tento sw umožňuje načíst CAD model např. ve formátu STEP a provést převedení řešené plochy na požadovanou síť (STL formát). Výhodou tohoto sw je možnost

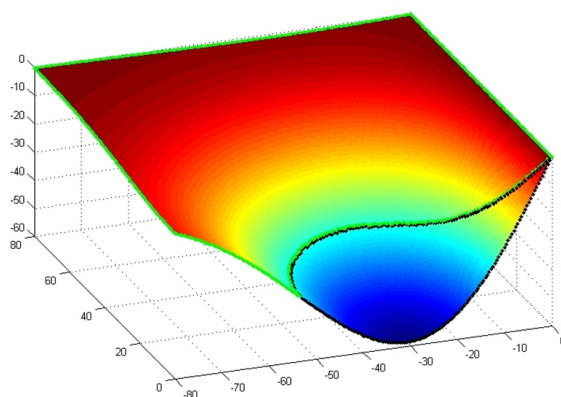
nastavení hrubosti výstupní sítě či lokální zjemnění dané oblasti, včetně možnosti nastavení jemnosti. Nevýhodou zvýšení přesnosti (jemnosti) je následně zvýšená datová velikost tvořeného výstupního souboru. Takto vyhotovený STL formát lze bez komplikací zpracovat v prostředí Matlab.

6.2 Výpočty s využitím programu Matlab pro všechny testované plochy

Algoritmus v prostředí Matlab načte STL data řešené plochy. Následně provede extrakci veškerých vrcholových bodů z importovaného STL souboru a to tak, že postupně zpracovává analyzované trojúhelníky včetně dané normály. Následně je proveden výpočet předepsaných geometrických parametrů takto upravené normalizované plochy. Tyto parametry jsou důležité pro získání informací ohledně charakteru plochy.

Nejprve je nutné provést výpočet jednotkových a normálových vektorů v každém bodě upravené normalizované plochy, pomocí rovnice 4.5. Následně jsou tyto jednotkové normálové vektory použity pro výpočet druhé základní formy plochy – výpočet křivosti, tj, jednotlivé hodnoty L , M a N . Z těchto hodnot následně, lze vypočítat potřebnou Gaussovu a střední křivost dané plochy. Gaussova křivost v každém bodě dané plochy je vypočítána dle rovnice 4.19. Střední křivost v každém bodě dané plochy je vypočítána dle rovnice 4.20. Výpočet Gaussovy a střední křivosti je důležitý pro získání vlastního rozdělení bodů do jednotlivých skupin – oblastí (konvexní, konkávní, případně sedlo). Dále nutné provést výpočet minimální a maximální křivosti pro všechny body, dle rovnice 4.21. Tento výpočet je důležitý pro definování maximálního použitelného průměru frézy pro obrábění v dané oblasti.

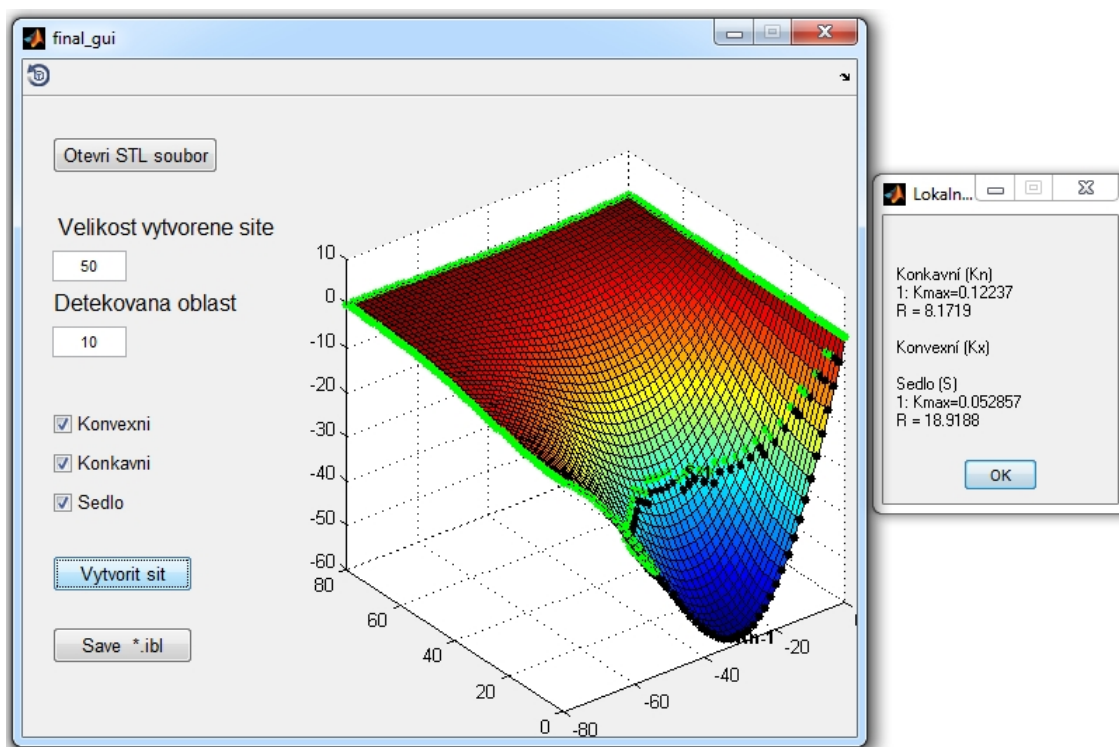
Výstupem těchto matematických operací jsou matice \mathbf{K} , \mathbf{H} , \mathbf{K}_{\max} , \mathbf{K}_{\min} . Po získání těchto hodnot se provede vlastní rozdělení plochy (bodů) do jednotlivých oblastí včetně výpočtu potřebných hranic. Výstupem rozdělení jsou souřadnice bodů (x, y, z) , které definují jednotlivé oblasti – konvexní, konkávní, sedlo (obrázek 6.1).



Obrázek 6.1: Rozdělení obecné plochy na jednotlivé oblasti v prostředí Matlab, zelená oblast – sedlová část, černá oblast – konkávní oblast

Pro bezobslužný import takto získaných dat – oblastí do prostředí CAD/CAM Pro/E, je provedena úprava dat. Každý typ oblasti je uložen do zvláštního datového souboru včetně potřebné hlavičky. Tento soubor je následně načten v příslušném programu jako zdrojová data pro hraniční křivku. Díky tomuto postupu odpadá import bodů v CAD systému a následná tvorba křivky.

Dílčím výstupem disertační práce je program v Matlabu (dialogové okno programu na obrázku 6.2), který využívá podkladů z práce *Dr. Tuonga* [31]. Rozšiřuje možnosti použitého algoritmu o další volby a možnosti. Jako je načítání externích dat z STL formátu, zobrazení řešených křivostí, uložení hranic jednotlivých typů oblastí do externích datových souborů.



Obrázek 6.2: Vytvořený program v prostředí Matlab na výpočet křivostí načtené plochy

6.3 Postupy v prostředí Pro/E pro všechny testované plochy

Software Pro/E umožňuje provést analýzu křivostí dané řešené plochy. Bohužel nelze, dle získané analýzy křivosti dané plochy, provést vlastní rozdělení obecné plochy na jednotlivé typy (konvexní, konkávní, sedlo). Proto je nutné provést výpočet hraničních křivek jednotlivých řešených oblastí mimo CAD program a následně importovat křivky (body) do tohoto programu. Tento postup je také nutný z důvodů

nemožnosti tvorby částí rozpoznaných tvarů ploch v programu Matlab v prostředí Pro/E či Catia.

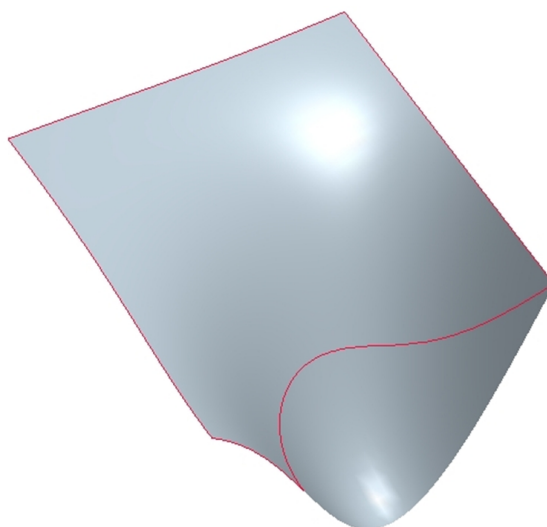
Postup v CAD/CAM

1. Export řešené plochy do formátu STEP (Pro/E, Catia).
2. Import do programu GOM Inspect V7.5 SR1, provést převod na STL.
3. Import jednotlivých hraničních křivek řešených oblastí z programu Matlab.
4. Rozdělit obecné plochy, dle hraničních křivek na jednotlivé části – „pláty“.
5. Export dané plochy do programu EdgeCAM (formát IGES, STEP)

Import vygenerovaného souboru s hraničními křivkami z programu Matlab do systému CAD/CAM je vždy specifický pro každý systém. V této práci je popsán import do programu Pro/E. Vlastní načtení křivek je prováděno pomocí souboru s příponou **.ibl*. Tento soubor je rozdělen do několika částí a obsahuje souřadnice veškerých hraničních bodů daného typu oblasti, které následně tvoří výstupní křivku. Následující text popisuje obsah zmiňovaného souboru:

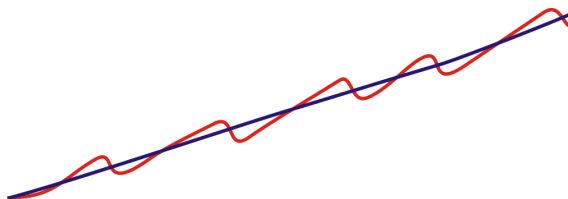
```
Open  Index  Arclength  % hlavička souboru
Begin section ! 1      % oblast č. 1 s jednou spline křivkou
Begin curve   ! 1      % začátek první spline křivky
13.756  32.655  26.843  % souřadnice bodu spline křivky
14.445  32.345  27.118
15.134  32.034  27.416
...
...
Begin section ! 2      % oblast č. 2 s jednou spline křivkou
Begin curve   ! 1      % začátek další spline křivky
21.336  20.529  32.317  % souřadnice bodu spline křivky
22.025  20.218  33.002
22.025  19.908  32.938
...
80.597  31.412  34.039
80.597  31.101  34.178
80.597  30.790  34.319
```

Použitím tohoto principu tvorby křivek, včetně jeho importu (načtení) do Pro/E, lze dané křivky načtené jako jeden prvek zpracovávat samostatně. Pokud by však nedošlo k potřebnému rozdělení stejných typů oblastí např. více sedel v datovém souboru pomocí *Begin Curve 1*, *Begin Curve 2*, ... byla by v Pro/E vytvořena pouze jedna spline křivka. U takto vytvořené spline křivky nelze provést editaci (vyhlazení, úpravy). Obrázek 6.3 zobrazuje importovanou křivku do CAD programu Pro/E přes funkci *křivka ze souboru*.



Obrázek 6.3: Importovaná hraniční křivka sedlové oblasti do řešené obecné plochy

V případě potřeby lze provést vyhlazení načtené křivky. Tento proces se provádí pomocí editace načtené křivky a to včetně nastavení stupně hladkosti *Smooth* – vyhlazení. Výsledek provedené úpravy je zobrazen na obrázku 6.4. Zde je zobrazena červenou barvou importovaná křivka. Modrá barva křivky zobrazuje výstup z editace křivky pomocí funkce *Smooth*. Naimportované křivky neleží přímo na zvolené

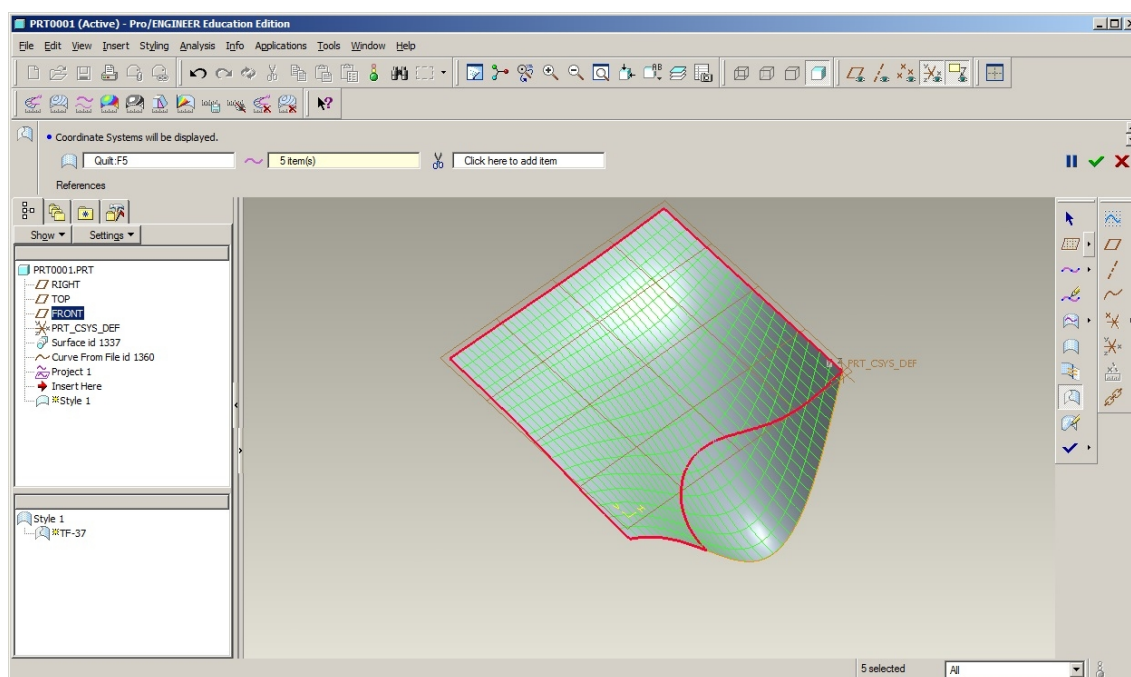


Obrázek 6.4: Editace křivky – možnost vyhlazení importované křivky pomocí funkce *Smooth* – zjemnění spline

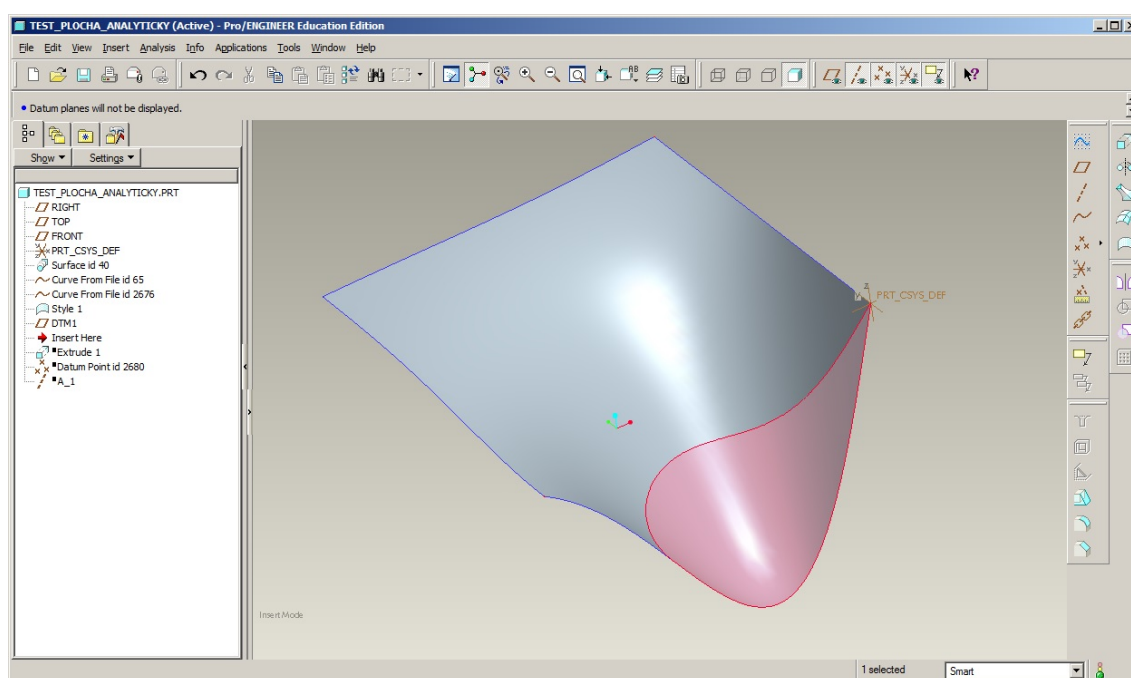
ploše (částečné posunutí bodů mimo oblast plochy z důvodu převodu trojúhelníkové sítě na mnohoúhelníkovou síť a import do prostředí Pro/E). Je tedy nutné provést projekci (promítnutí) dané křivky na řešenou plochu. Tato projekce se provede s využitím funkce *Project*, která umožní projekci spline křivky na plochu.

Následující operací v CAD systému Pro/E je rozdělení řešené plochy a to dle importovaných křivek. Vlastní realizace je pomocí funkce *Style*, kde po označení dané plochy a promítnuté křivky na plochu dojde k rozdělení na jednotlivé pláty. Jeden takto vytvořený konkávní plát je zobrazen na obrázku 6.5. Červená hraniční křivka zde rozděluje řešenou plochu na jednotlivé části.

Vlastní rozdělení řešené plochy na jednotlivé pláty je zobrazen na 6.6. Poslední operací je uložení řešené plochy do formátu STEP, který je následně načten v systému EdgeCAM, kde se provede vlastní aplikační obrobení řešené plochy. Výše uvedené postupy jsou společné pro následné testovací plochy.



Obrázek 6.5: Využití funkce Style – Surface Trim pro rozdělení plochy



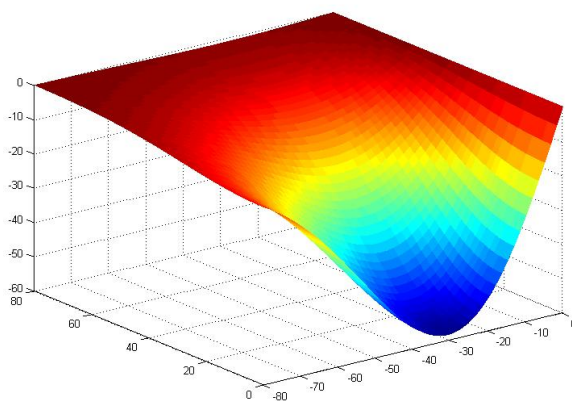
Obrázek 6.6: Rozdělená plocha na jednotlivé pláty – barevně zvýrazněná konkávní část

6.4 Postupy v programu EdgeCAM (PowerMill) pro všechny testované plochy

Poslední částí, pro všechny uvažované plochy, je ověření algoritmu rozdělení ploch na praktických testech obrábění. V prvních fázích byl využit software EdgeCAM pro obráběcí centrum Mazak Integrex 100 – IV [40]. Bohužel při tvorbě NC drah nástroje pro 5osé operace na řešených plochách došlo k překročení rozsahu omezení lineární osy y . Nedostatkem stroje je velice malý rozsah pohybu dané lineární osy. Další testy zkoumaných ploch byly prováděny na frézovacím centru Sahos Dynamic [25] s větším pracovním rozsahem lineárních os. U toho centra byl využit sw PowerMill, který má dodavatelem vytvořený postprocesor (překladač NC drah do jazyka stroje) pro daný stroj. Bohužel pro sw EdgeCAM není k dispozici adekvátní postprocesor pro tento stroj. První kontrolovanou operací je obrobení dané plochy s jedním nástrojem. Dalším krokem je obrobení rozdělené plochy a porovnání obou výsledků z hlediska času pro dokončovací operace a celkové délky dráhy nástroje při vlastním obrábění. U obou řešení bylo vždy využito parametru „*příčná drsnost*“. Tento parametr určuje počet potřebných drah nástroje pro obrobení dané plochy ve stejné kvalitě – drsnosti.

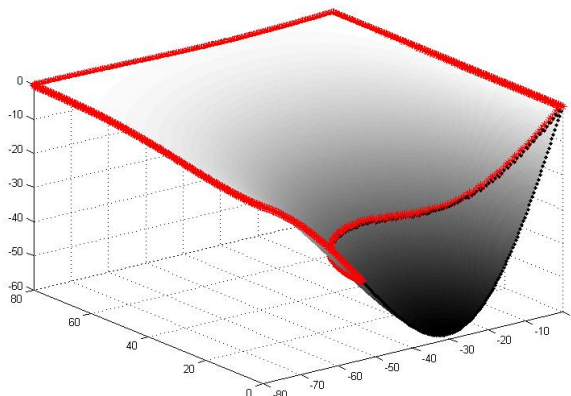
6.5 Praktické testy algoritmu na definované analytické ploše

Pro ověření funkčnosti algoritmu je první plocha na testování definována matematickým vztahem, který je popsán v rovnici 4.24. Tato plocha byla matematicky vygenerována v prostředí Matlab, viz obrázek 6.7. Výsledná testovaná plocha byla upravena měřítkem (40krát zvětšeno) tak, aby bylo možno provést objektivní hodnocení dané metody vůči dalším testovaným plochám.



Obrázek 6.7: Analyticky definovaná plocha v prostředí Matlab

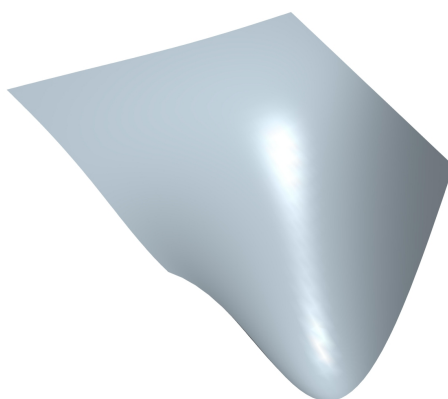
V programu Matlab byly provedeny potřebné operace pro výpočet všech křivostí a výstupem těchto operací jsou soubory, které obsahují veškeré hraniční křivky řešené plochy. Na obrázku 6.8 je zobrazená plocha v prostředí Matlab včetně rozpoznaných hranic daných oblastí.



Obrázek 6.8: Analyticky definovaná plocha, výpočet hraničních oblastí, červená barva – sedlová oblast, černá barva – konkávní oblast

Výstupní data z programu Matlab v podobě rozdělených oblastí lze následně použít v programu Pro/E, které se využijí pro rozdělení obecné plochy. Rozpoznané oblasti analyticky zadané plochy byly porovnány s rozdělením testovací importované STL plochy do prostředí Matlab.

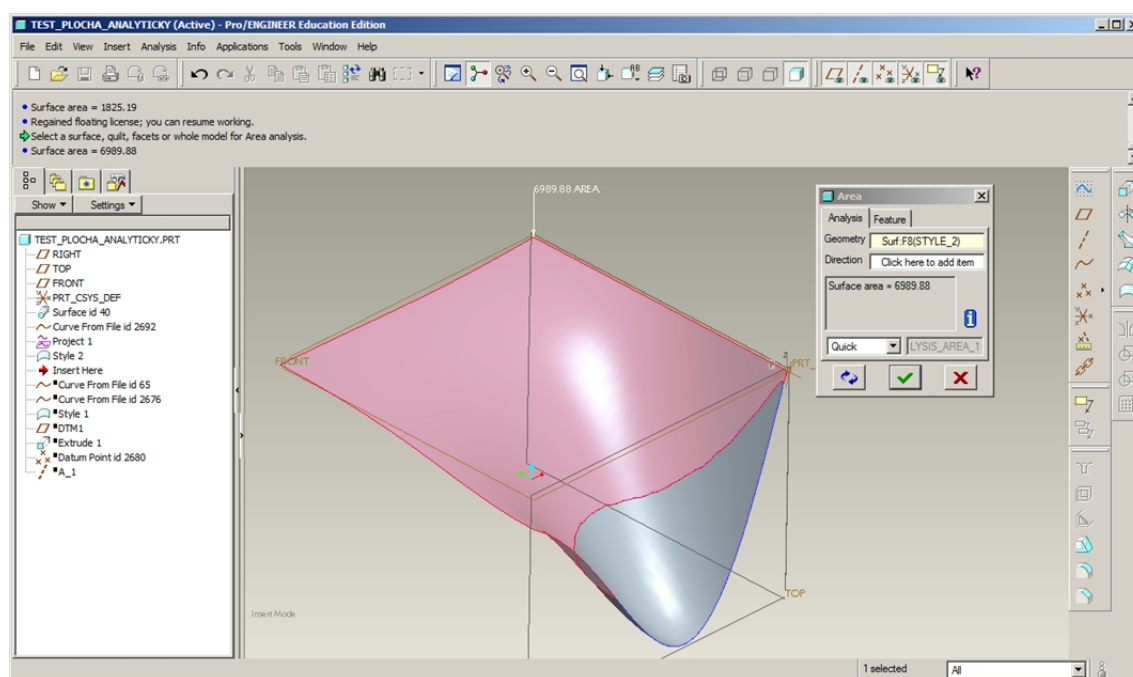
V programu Pro/E nelze provést matematické zadání analytické 3D plochy. Proto pro načtení (import) řešené plochy do Pro/E byla použita funkce *Blend from file*. Tato funkce umožňuje načíst vrcholové body plochy, které byly získány z analyticky zadané plochy v programu Matlab. Následně je těmito body proložena spline křivka a to jak v rovině zy tak i zx . Výstupní částí dané funkce je plocha, která je zobrazena na obrázku 6.9.



Obrázek 6.9: Importovaná analyticky definovaná plocha v prostředí Pro/E

Načtená plocha byla exportována do formátu STEP. Následně se provedl převod dat do STL formátu s využitím GOM Inspect V7.5 SR1. Import těchto dat do programu Matlab slouží k ověření funkčnosti algoritmu. Ověření spočívá v porovnání plošného obsahu vytvořených hraničních oblastí a to z analyticky zadané plochy a importované STL plochy. Výpočet byl proveden jak v programu Matlab, tak i v Pro/E.

Výpočet v programu Matlab je převzat od *Richarda Browna* [15], který se zabývá problematikou plošného obsahu obecných ploch. Jeho algoritmus umožňuje výpočet plošného obsahu z již vytvořené mnohoúhelníkové sítě. Pro výpočet plošného obsahu v programu Pro/E je použita vnitřní analýza plochy, která zobrazí informace o řešené ploše, oblasti, viz obrázek 6.10.



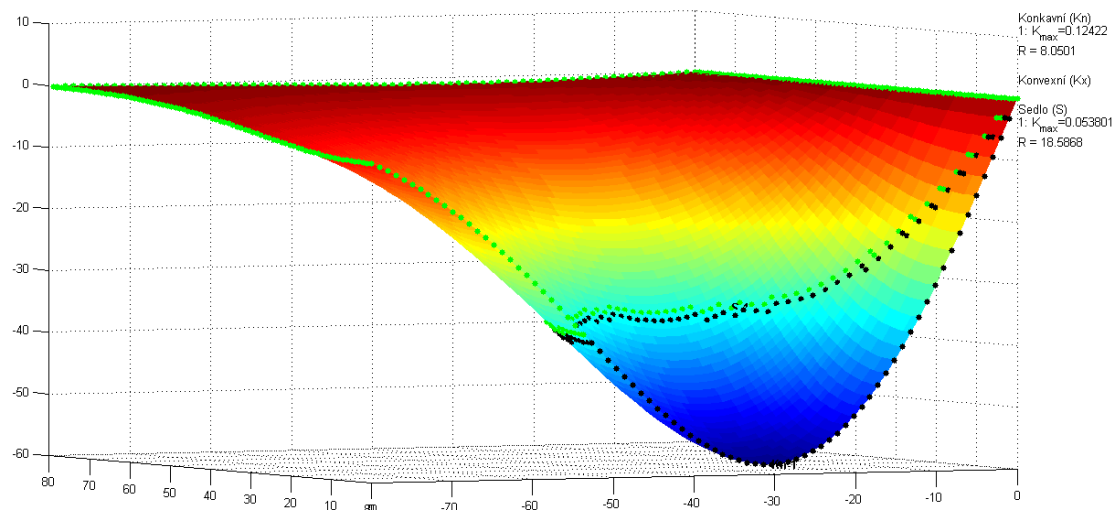
Obrázek 6.10: Výpočet plošného obsahu plochy v programu Pro/E

Výsledkem porovnání obou řešených přístupů je odchylka plošného obsahu do 1 %. Hodnoty plošného obsahu z analýz a výpočtů jsou uvedeny v tabulce 6.1. Díky této nízké odchylce lze navrhovanou metodu použít a otestovat na praktických příkladech.

Tabulka 6.1: Vypočtené obsahy plochy v jednotlivých programech

Typ oblasti	Analyticky v Matlabu [mm ²]	STL v Matlabu [mm ²]	Analyticky v Pro/E [mm ²]	STL v Pro/E [mm ²]
Konkávní	1 897	1 853	1 879	1 827
Sedlo	6 917	6 961	6 936	6 988
Celá plocha	8 814	8 814	8 815	8 815

Na obrázku 6.11 jsou zobrazeny vypočítané hraniční oblasti jednotlivých přístupů jedné plochy, včetně rozdělení plochy na několik částí. Černě označené jsou konkávní oblasti, zelené jsou sedlové. Tato plocha neobsahuje konvexní oblasti. Jednotlivé křivosti těchto oblastí jsou uvedeny v tabulce 6.2.



Obrázek 6.11: Plocha z STL dat, výpočet hraničních oblastí

Tyto výpočty nám pomohou zvolit optimální (maximální) poloměr nástroje s kulovým zakončením, který lze pro danou řešenou oblast použít.

Po provedení veškerých nutných operací, které zahrnují výpočty v prostředí Matlab, import hraničních křivek do Pro/E a rozdělení dané plochy na jednotlivé pláty. Je možno řešenou plochu exportovat do systému EdgeCAM a provést vlastní obrobení.

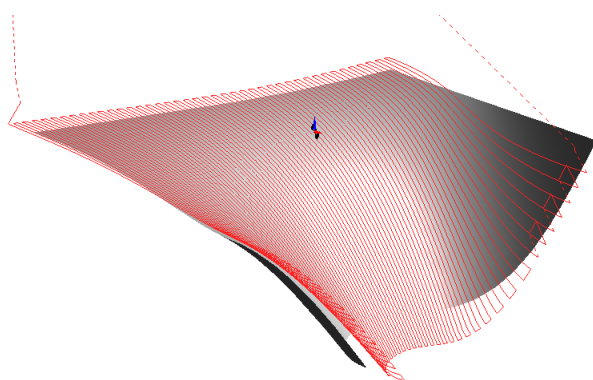
V tomto programu bylo provedeno postupné obrobení jednotlivých oblastí doporučeným nástrojem dle vypočítaných křivosti – max. poloměrů nástrojů. První operací je hrubování s celkovým přídávkem pro dokončení 0,2 mm. Pro hrubovací operace bylo využito 3osého frézování a nástrojů o průměru 20 mm a pro obrobení zbytků nástroj o průměru 12 mm. Pro dokončovací operace sedla a konkávní oblasti bylo využito 5osé frézování s definovaným pevným náklonem nástroje vůči obráběné ploše. Tento způsob byl zvolen z důvodu eliminace frézování v ose kulového nástroje, kde je nulová řezná rychlost. Tímto se docílí posunutí oblasti řezu směrem od osy nástroje. Dále se zvýší hodnota řezné rychlosti, dojde ke zlepšení životnosti nástroje a utváření třísky. V neposlední řadě se zvýší i kvalita obrobené plochy. Dalším využitým parametrem pro obrábění je parametr „příčná drsnost“, který ovlivňuje

Tabulka 6.2: Hodnoty K_{max} a R_{max} pro řešenou plochu

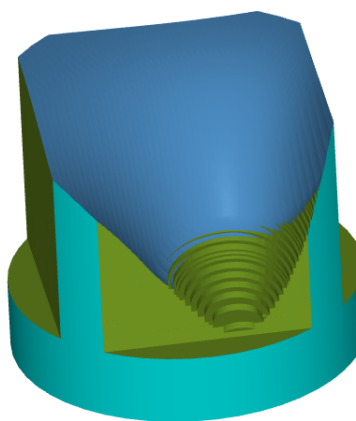
Typ oblasti	Křivost K_{max} [mm ⁻¹]	Max. poloměr nástroje R_{max} [mm]
Konkávní – černá	0,12	8,0
Sedlo – zelená	0,05	18,5

potřebné rozteče drah nástroje tak, aby výsledná drsnost povrchu nebyla nad zadanou hodnotu. Výhodou 5osého frézování je i využití kratších a tím tužších nástrojů.

Pro sedlovou oblast byl zvolen nástroj s kulovým zakončením o průměru 36 mm. Tuto sedlovou část lze případně i obrobit s pomocí nástroje s rovným zakončením či nástroj s rohovým zaoblením (rádius). Díky těmto volbám lze zvolit i vyšší zatížení na daný nástroj – vyšší posuv na zub, vyšší řezná rychlost, které přinesou snížení hlavních časů při obrábění. Vytvořené NC dráhy nástroje pro danou oblast jsou zobrazeny na obrázku 6.12a.



(a) NC dráhy nástroje pro obrábění sedlové části plochy



(b) Simulace obrábění pro sedlovou oblast

Obrázek 6.12: Obrobená analyticky definovaná plocha v prostředí EdgeCAM

Použité řezné podmínky pro frézování jednotlivých oblastí jsou popsány v tabulce 6.3. Hodnoty využité při programování drah nástrojů vycházejí z technického katalogu od firmy Coromant Sandvik [26]. Hodnoty odpovídají frézování hliníkových slitin

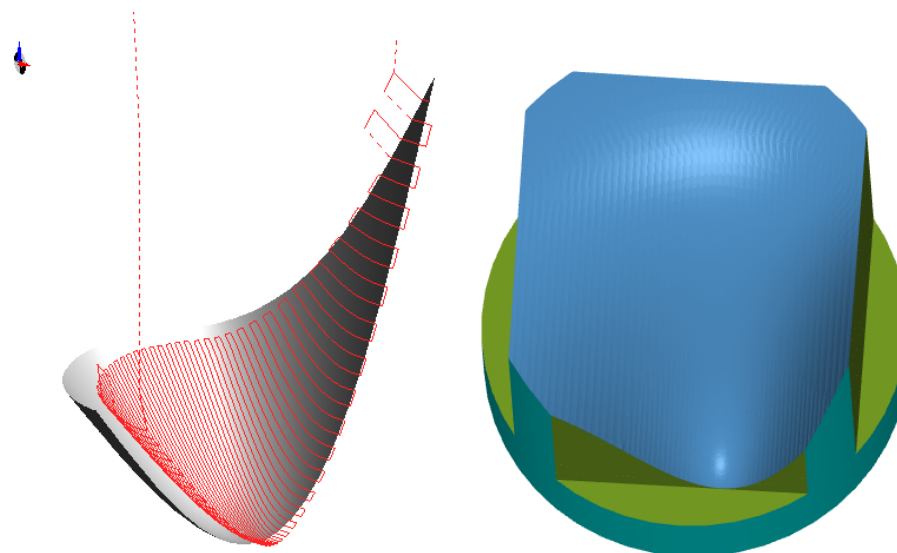
Tabulka 6.3: Řezné parametry pro obrábění testované plochy

Parametry pro frézování	Nástroj Ø 16 mm	Nástroj Ø 36 mm
Posuv na zub [mm]	0,16	0,35
Řezná rychlost [m/min]	120	120
Příčná drsnost [mm]	0,02	0,02

Doba obrobení, dle virtuální simulace pro kulový nástroj o průměru 32 mm byla 6:29 min a celková dráha nástroje 5,09 m. Výsledek ze simulace obrobení sedlové části řešené plochy je zobrazen na obrázku 6.12b.

Konkávní oblast řešené plochy, která je zobrazena na obrázku 6.13a, byla obrobena pomocí nástroje s kulovým zakončením o průměru 16 mm. Doba obrobení dané části, dle virtuální simulace, byla 1:32 min a celková dráha nástroje 1,3 m.

Výsledek ze simulace obrábění konkávní oblasti pomocí 5osé operace je zobrazen na obrázku 6.13b.



(a) NC dráhy nástroje pro obrábění konkávní části plochy (b) Simulace obrábění pro konkávní oblast

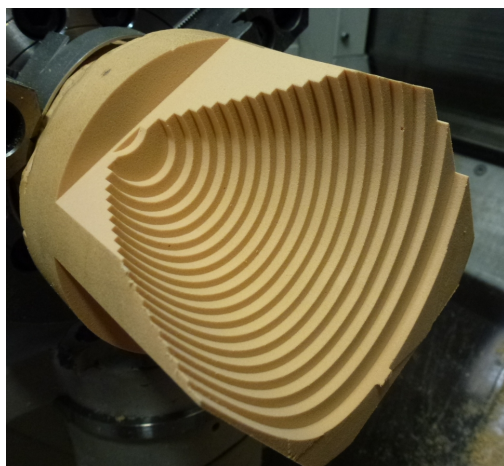
Obrázek 6.13: Obrobená analytická plocha v prostředí EdgeCAM

Kompletní obrobení řešené plochy pouze jedním nástrojem s kulovým zakončením lze provést s nástrojem o průměru 16 mm a menším. Důvodem je limitující prostor pro spodní část řešené plochy. Výsledky s hodnotami jsou zobrazeny v tabulce 6.4.

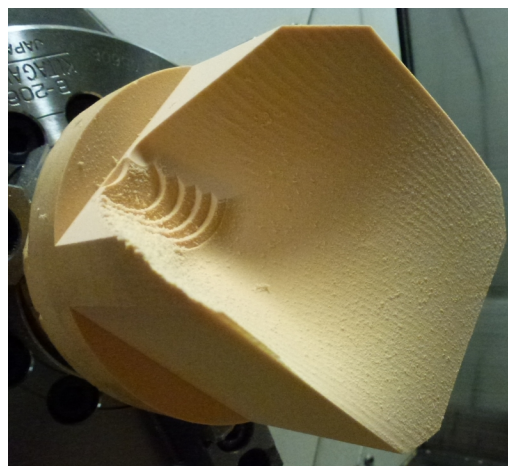
Tabulka 6.4: Rozdělení obrábění dle potřebného času

Typ obrábění	Doba obrábění [min]	Celková dráha nástroje [m]
1 oblast (klasický přístup)	9:19 (100 %)	7,07 (100 %)
2 oblasti (nově navrhovaný přístup)	8:01 (86,23 %)	6,39 (90,38 %)

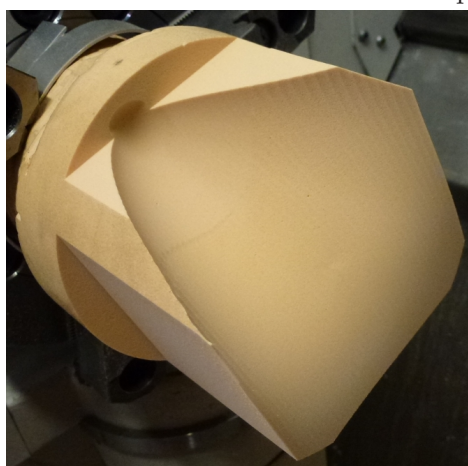
Doba obrábění podle virtuální simulace, byla 9:19 min a celková dráha nástroje 7,07 m. Jedním z hlavních přínosů je snížení potřebného času na obrobení dané obecné plochy a také snížení délky dráhy nástroje. Díky rozdělení dojde k využití více nástrojů a možnosti ovlivnění tvorby dráhy nástrojů pro každou oblast zvlášť. Praktické výsledky obrábění jsou zobrazeny na obrázcích 6.14a, 6.14b, 6.14c. Pro praktické obrobení byl použit materiál *Necuron 651*. Tento materiál byl dostupný v době praktických testů.



(a) Testovací plocha – po hrubovací operaci



(b) Testovací plocha – po prvním obrobení částečné plochy



(c) Testovací plocha – po druhém obrobení částečné plochy

Obrázek 6.14: Praktické obrobení analyticky zadané plochy.

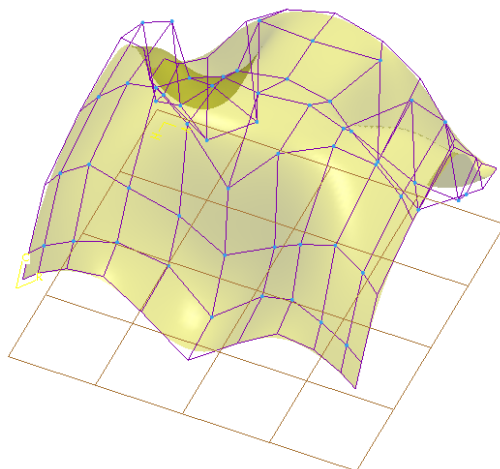
6.6 Praktické testy zpracování obecných ploch

Po ověření funkčnosti algoritmu na analyticky zadané ploše je dalším krokem otestování tohoto algoritmu (postupu) i na obecných plochách, tj. datech, které nejsou popsány jednou matematickou funkcí.

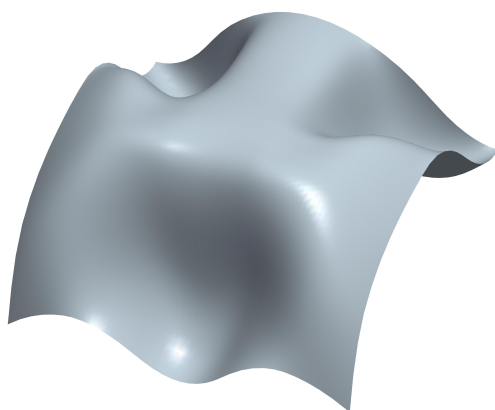
6.6.1 Testovací plocha – č. 1

Celkově druhou zpracovávanou testovací plochou je obecná plocha tvořená pomocí funkce *Style* v CAD programu Pro/E. Funkce umožňuje měnit (ovládat) pozice kontrolních bodů plochy – grid body, díky kterým lze libovolně formovat výsledný tvar plochy, viz obrázek 6.15. Plocha je následně uložena v univerzálním datovém formátu STEP, viz obrázek 6.16. Tento formát je využit pro načtení v programu

GOM Inspect, kde dojde k finálnímu převodu na polygonální síť – datový formát STL.



Obrázek 6.15: Tvorba *Obecné plochy č. 1* pomocí funkce *Style*

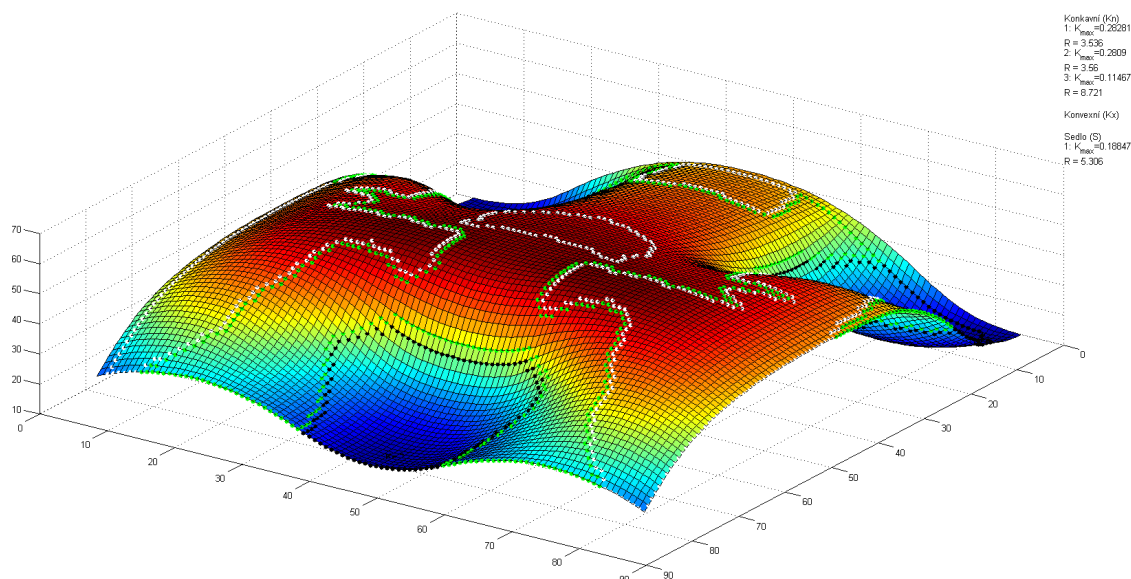


Obrázek 6.16: Celistvá *Obecná plocha č. 1* v Pro/E

Data uložená ve formátu STL jsou následně využita pro výpočet všech potřebných matematických úkonů v prostředí Matlab. Program vytvořený v tomto prostředí provede výpočet křivosti řešené plochy a požadované informace zobrazí v daném okně programu, viz obrázek 6.17.

Dle obrázku 6.17, je patrné rozdělení řešené plochy na několik částí. Černě označené jsou konkávní oblasti, zelené jsou sedlové. Tato plocha obsahuje také konvexní oblasti, které jsou značené bíle. Jednotlivé křivosti těchto oblastí jsou shrnuty v tabulce 6.5.

Výsledné hodnoty křivosti pro konvexní oblasti nejsou potřebné. Pro obrábění těchto částí se využije stejný nástroj, který je použit pro obrábění sedlové části, či dostupný větší. Tento způsob je výhodný z důvodu využití stávajícího nástroje při obrábění.



Obrázek 6.17: Testovaná *Obecná plocha č. 1* v prostředí Matlab, včetně výpočtu max. křivosti

Dle výsledků z tabulky č. 6.5 jsou patrné průměry resp. poloměry optimálně využitých nástrojů s kulovým zakončením. Je tedy výhodné použít tyto či velice průměrově blízké nástroje pro vlastní obrobení. Dalším výstupem z tohoto programu jsou hraniční křivky (množina bodů pro každou oblast), které definují v systému Pro/E rozpoznané oblasti.

Tabulka 6.5: Hodnoty K_{max} a R_{max} pro řešenou *Obecnou plochu č. 1*

Typ oblast	Křivost K_{max} [mm ⁻¹]	Max. poloměr nástroje R_{max} [mm]
Sedlo – zelená	0,18	5,55
Konkávni 1 – černá	0,11	9,09
Konkávni 2 – černá	0,28	3,57
Konkávni 3 – černá	0,28	3,57

Zde se také provádí rozdělení celé řešené oblasti na jednotlivé pláty. Výstupním datovým souborem je opět formát STEP, který lze použít pro různé CAM programy, viz obrázek 6.18.

Vlastní obrobení již neproběhlo na stejném obráběcím centru. Důvodem byl malý rozsah lineární osy y stroje při použití 5osé obráběcí instrukce. Další obrábění se tedy provádělo na stroji Sahos Dynamic [25] s využitím dalšího CAM (pro systém EdgeCAM nebyl k dispozici adekvátní postprocesor). Díky tomu došlo k dalšímu ověření bezproblémového načítání exportovaných dat z programu Pro/E do dalšího CAM programu.

Postup frézovacích operací byl stejný jako u předchozí řešené plochy. Nejprve byla provedena hrubovací operace – použito 3osé frézování přídávkem na dokončení



Obrázek 6.18: Rozdělená *Obecná plocha č. 1* v Pro/E na jednotlivé pláty

0,2 mm. Následně bylo postupně prováděno obrábění jednotlivých plátů dle nástrojů z tabulky 6.6.

Tabulka 6.6: Hodnoty průměrů nástrojů pro řešenou *Obecnou plochu č. 1*

Typ oblasti	Maximální průměr nástroje [mm]	Zvolený průměr nástroje [mm]
Sedlo – zelená	11,1	10
Konkávní 1 – černá	18,8	16
Konkávní 2 – černá	7,14	6
Konkávní 3 – černá	7,14	6

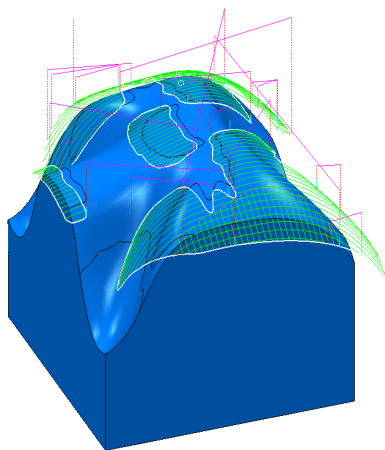
První dokončovací operací bylo obrábění konvexních částí nástrojem s kulovým zakončením o průměru 20 mm. Jednotlivé pláty je možno obrábět zvlášť či dohromady. Jelikož se nejedná o problematickou část plochy, je výhodné obrábět tyto pláty (části) dohromady. Výsledkem této operace je 5osé obrábění plátů, viz obrázek 6.19a.

Druhou dokončovací operací bylo obrábění sedlového plátu nástrojem s kulovým zakončením o průměru 10 mm. Při této 5osé instrukci bylo využito řízení nástroje – vedení nástroje po křivce. Výsledkem této operace je 5osé obrábění plátu, viz obrázek 6.19b.

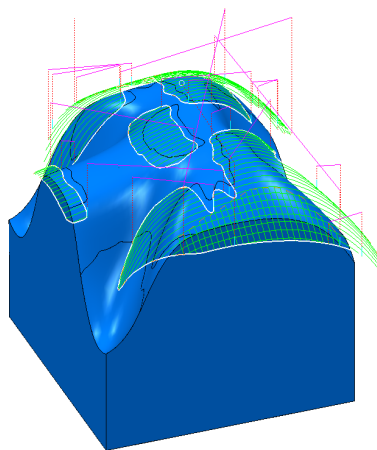
Třetí dokončovací operací bylo obrábění jedné konkávní části nástrojem s kulovým zakončením o průměru 16 mm. Pro řízení nástroje u 5osého obrábění tohoto plátu bylo využito řízení nástroje – relativně ve směru pohybu s potřebným nastavením všech úhlů (náklon ve směru pohybu nástroje a boční náklon nástroje). Výsledkem této operace je 5osé obrábění plátu, viz obrázek 6.19c.

Čtvrtou dokončovací operací bylo obrábění dvou konkávních částí nástrojem s kulovým zakončením o průměru 6 mm. Při užití tohoto postupu pro 5osé

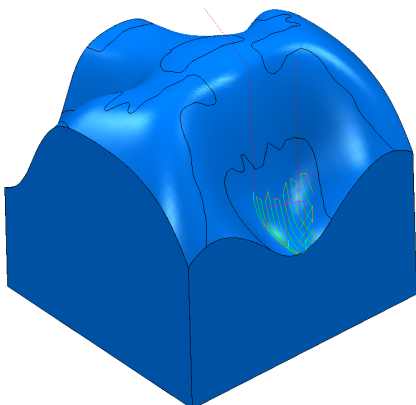
obrábění bylo využito řízení nástroje – relativně ve směru pohybu s potřebným nastavením všech úhlů (náklon ve směru pohybu nástroje a boční náklon nástroje). Výsledkem této operace je 5osé obrábění dvou plátů viz obrázek 6.19d.



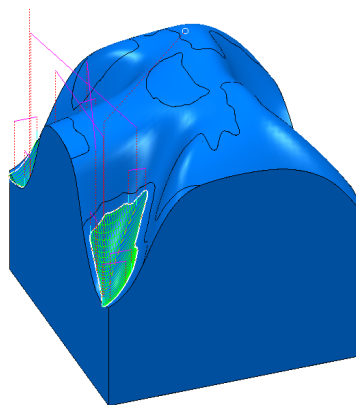
(a) Dokončovací operace – obrábění konvexních částí *Obecné plochy č. 1*



(b) Dokončovací operace – obrábění sedlové části *Obecné plochy č. 1*



(c) Dokončovací operace – obrábění jedné konkávní části *Obecné plochy č. 1*



(d) Dokončovací operace – obrábění dvou konkávních částí *Obecné plochy č. 1*

Obrázek 6.19: Obrobená *Obecná plocha č. 1* dle navrhované metody v simulátoru obrábění

Použité řezné podmínky pro frézování jednotlivých oblastí jsou popsány v tabulce 6.7.

Výsledkem těchto separátních obrábění je kratší dráha nástroje oproti konvenčnímu přístupu, kdy se obrábí celá plocha pouze jedním nástrojem. Pro obrobení celé plochy by byl použit jeden nástroj o průměru 7 mm a menší. Důvodem je limitující prostor pro spodní část řešené plochy. Výsledky s hodnotami jsou zobrazeny v tabulce 6.8.

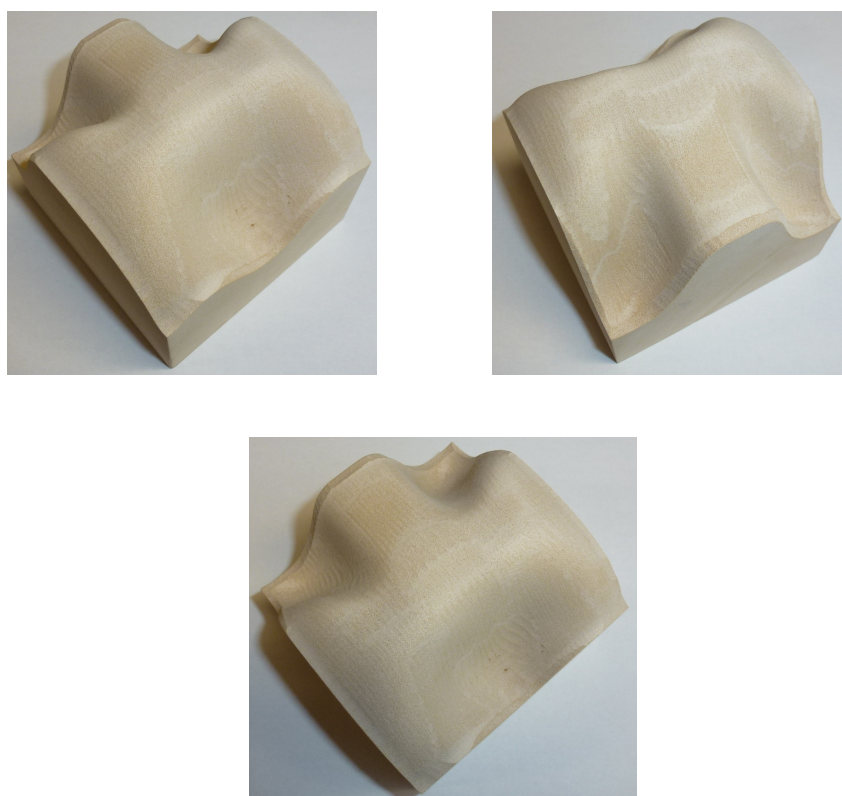
Tabulka 6.7: Řezné parametry pro obrábění *Obecné plochy č. 1*.

Parametry pro frézování	Nástroj Ø 6 mm	Nástroj Ø 10 mm	Nástroj Ø 16 mm	Nástroj Ø 20 mm
Posuv na zub [mm]	0,10	0,12	0,16	0,25
Řezná rychlost [m/min]	120	120	120	120
Příčná drsnost [mm]	0,02	0,02	0,02	0,02

Tabulka 6.8: Rozdělení obrábění, dle potřebného času pro *Obecnou plochu č. 1*

Typ obrábění	Doba obrobění [min]	Celková dráha nástroje [m]
1 oblast (klasický přístup)	12:16 (100 %)	15,62 (100 %)
4 oblasti (nově navrhovaný přístup)	11:42 (95,38 %)	10,89 (69,72 %)

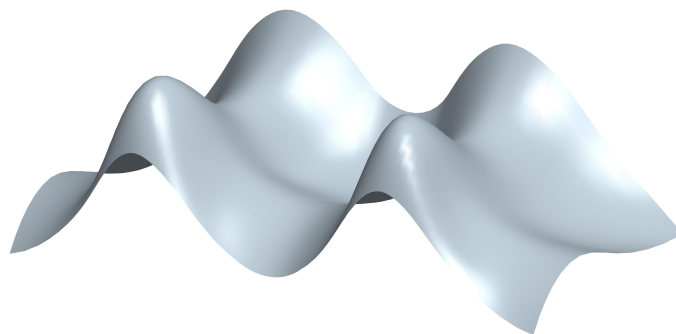
Doba obrobění, dle virtuální simulace, byla 11:42 min a celková dráha nástroje 10,89 m. Jedním z hlavních přínosů je snížení potřebného času na obrobění dané obecné plochy a také velké snížení délky dráhy nástroje. Díky rozdělení dojde k využití více nástrojů a možnosti ovlivnění tvorby dráhy nástrojů pro každou oblast zvlášť. Praktické výsledky obrobění jsou zobrazeny na obrázku 6.20.



Obrázek 6.20: Obrobená *Obecná plocha č. 1* dle navrhované metody z různých úhlů pohledu

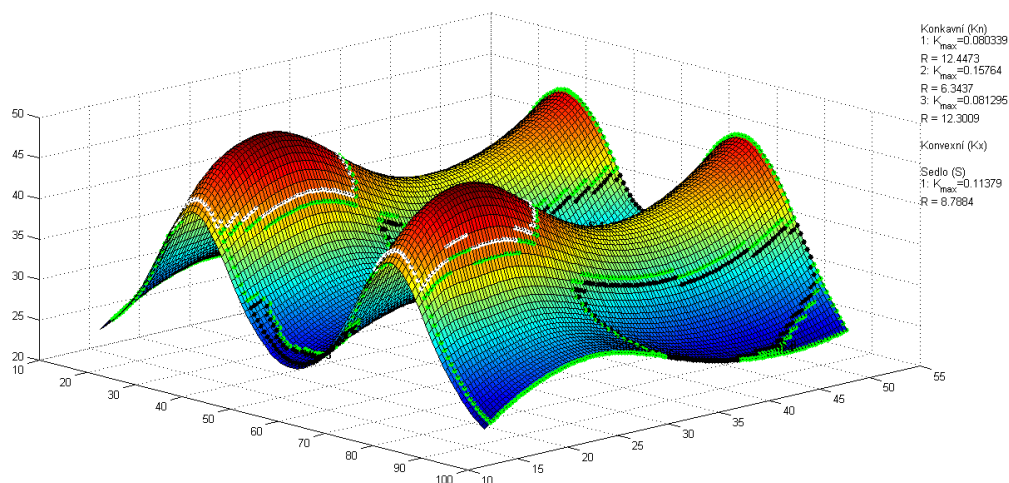
6.6.2 Testovací plocha – č. 2

Poslední zpracovávanou testovací plochou je obecná plocha opět tvořena pomocí funkce *Style* v CAD programu Pro/E. Plocha je následně uložena v univerzálním datovém formátu STEP, viz obrázek 6.21. Tento formát je využit pro načtení v programu GOM Inspect, kde dojde k finálnímu převodu na polygonální síť – datový formát STL.



Obrázek 6.21: Celistvá *Obecná plocha č. 2* v Pro/E

Na obrázku 6.22 je zobrazen výstup algoritmu z prostředí Matlab. Je patrné rozdělení řešené plochy na několik částí. Černě označené jsou konkávní oblasti, zelené jsou sedlové. Tato plocha obsahuje také konvexní oblasti, které jsou značené bíle. Jednotlivé křivosti těchto oblastí jsou následující:



Obrázek 6.22: Testovaná *Obecná plocha č. 2* v prostředí Matlab, včetně výpočtu max. křivosti

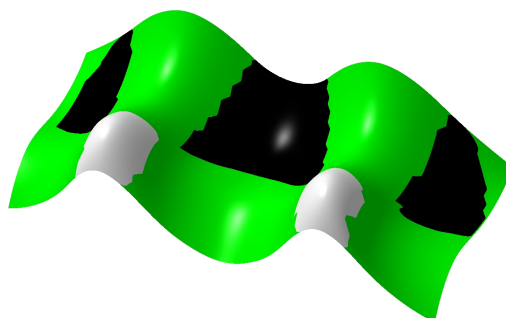
Výsledné hodnoty křivosti pro konvexní oblasti nejsou potřebné. Pro obrábění těchto částí se využije stejný nástroj, který je použit pro obrábění konkávní části, či dostupný větší. Tento způsob je výhodný z důvodu využití stávajícího nástroje při obrábění.

Dle výsledků z tabulky 6.9 jsou patrné průměry, resp. poloměry, optimálně využitých nástrojů s kulovým zakončením. Je tedy výhodné použít tyto či velice průměrově blízké nástroje pro vlastní obrobení. Dalším výstupem z tohoto programu jsou opět hraniční křivky (množina bodů pro každou oblast), které definují v systému Pro/E rozpoznané oblasti. Zde se také provádí rozdělení celé řešené oblasti na jednotlivé pláty. Výstupním datovým souborem je opět formát STEP, který, lze použít pro různé CAM programy, viz obrázek 6.23.

Tabulka 6.9: Hodnoty K_{max} a R_{max} pro řešenou *Obecnou plochu č. 2*

Typ oblast	Křivost K_{max} [mm ⁻¹]	Max. poloměr nástroje R_{max} [mm]
Sedlo – zelená	0,11	9,09
Konkávní 1 – černá	0,08	12,5
Konkávní 2 – černá	0,15	6,66
Konkávní 3 – černá	0,08	12,5

V době praktických testů nebyl k dispozici kulový nástroj o průměru 25 mm. Tento nástroj byl nahrazen nástrojem s kulovým zakončením o průměr 20 mm dle kterého byly upraveny i potřebné dráhy nástrojů, viz tabulka 6.10 .



Obrázek 6.23: Rozdělená *Obecná plocha č. 2* v Pro/E na jednotlivé pláty

Postup frézovacích operací byl stejný jako u předchozí řešené plochy. Nejprve byla provedena hrubovací operace – použito 3osé frézování přídavkem na dokončení 0,2 mm. Následně bylo postupně prováděno obrábění jednotlivých plátů, které byly rozpoznány pomocí algoritmu.

Tabulka 6.10: Hodnoty průměrů nástrojů pro řešenou *Obecnou plochu č. 2*

Typ oblasti	Maximální průměr nástroje [mm]	Zvolený průměr nástroje [mm]
Sedlo – zelená	18,18	16
Konkávní 1 – černá	25,00	25
Konkávní 2 – černá	13,32	12
Konkávní 3 – černá	25,00	25

První dokončovací operací bylo obrábění konvexních částí nástrojem s kulovým zakončením o průměru 20 mm. Jednotlivé pláty je možno obrábět zvlášť či dohromady. Jelikož se nejedná o problematickou část plochy, je výhodné obrábět tyto dva pláty dohromady. Výsledkem této operace je 5osé obrábění dvou plátů, viz obrázek 6.24a.

Druhou dokončovací operací bylo obrábění sedlového plátu nástrojem s kulovým zakončením o průměru 16 mm. Při této 5osé instrukci bylo využito řízení nástroje – vedení nástroje do bodu. Výsledkem této operace je 5osé obrábění plátů, viz obrázek 6.24b.

Třetí dokončovací operací bylo obrábění dvou bočních konkávních částí nástrojem s kulovým zakončením o průměru 20 mm. Při této 5osé instrukci bylo využito řízení nástroje – relativně ve směru pohybu s potřebným nastavením všech úhlu (náklon ve směru pohybu nástroje a boční náklon nástroje). Výsledkem této operace je 5osé obrábění dvou plátů, viz obrázek 6.24c.

Čtvrtou dokončovací operací bylo obrábění jedné konkávní části nástrojem s kulovým zakončením o průměru 12 mm. Při této 5osé instrukci bylo využito řízení nástroje – relativně ve směru pohybu s potřebným nastavením všech úhlu (náklon ve směru pohybu nástroje a boční náklon nástroje). Výsledkem této operace je 5osé obrábění jednoho plátu, viz obrázek 6.24d.

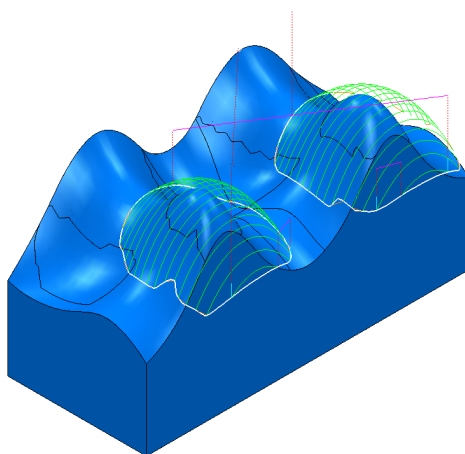
Použité řezné podmínky pro frézování jednotlivých oblastí jsou popsány v tabulce 6.11.

Tabulka 6.11: Řezné parametry pro obrábění *Obecné plochy č. 2*

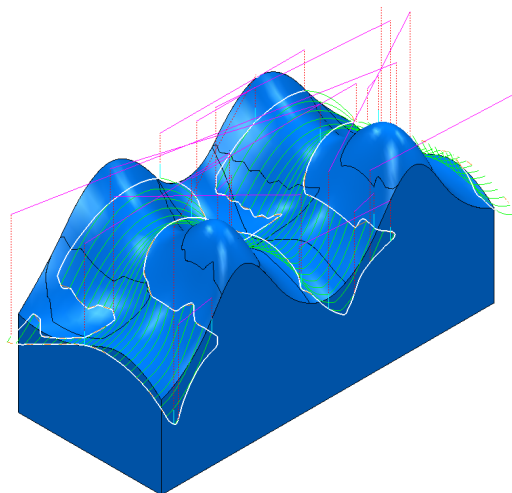
Parametry pro frézování	Nástroj – Ø 12 mm	Nástroj – Ø 16 mm	Nástroj – Ø 20 mm
Posuv na zub [mm]	0,14	0,16	0,25
Řezná rychlost [$\frac{m}{min}$]	120	120	120
Příčná drsnost [mm]	0,02	0,02	0,02

Výsledkem těchto separátních obrábění je nejen kratší dráha nástroje, oproti konvenčnímu přístupu, kdy se obrábí celá plocha pouze jedním nástrojem. Pro obrobění celé plochy by byl použit jeden nástroj o průměru 12 mm a menší. Důvodem je limitující prostřední část řešené plochy – konkávní oblast. Výsledky s hodnotami jsou zobrazeny v tabulce 6.12.

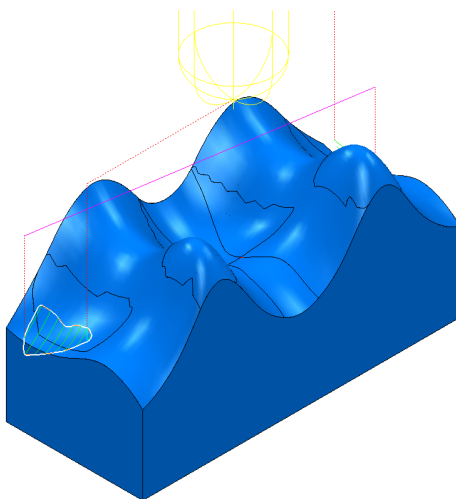
Doba obrobění, dle virtuální simulace, byla 3:28 min a celková dráha nástroje 2,91 m. Jedním z hlavních přínosů je snížení potřebného času na obrobění dané obecné plochy a také velké snížení délky dráhy nástroje. Díky rozdělení dojde k využití více nástrojů a možnosti ovlivnění tvorby dráhy nástrojů pro každou oblast zvlášť. Praktické výsledky obrobění jsou zobrazeny na obrázku 6.25.



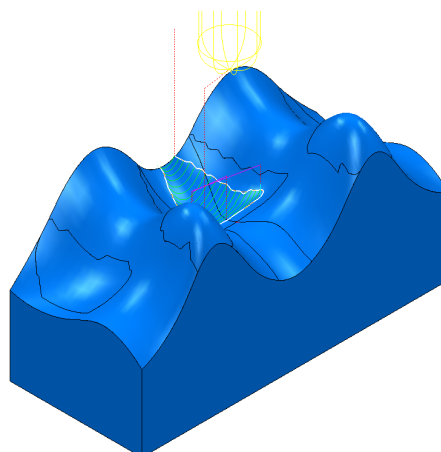
(a) Dokončovací operace – obrábění dvou konvexních částí *Obecné plochy* č. 2



(b) Dokončovací operace – obrábění sedlové části *Obecné plochy* č. 2



(c) Dokončovací operace – obrábění dvou konkávních částí *Obecné plochy* č. 2

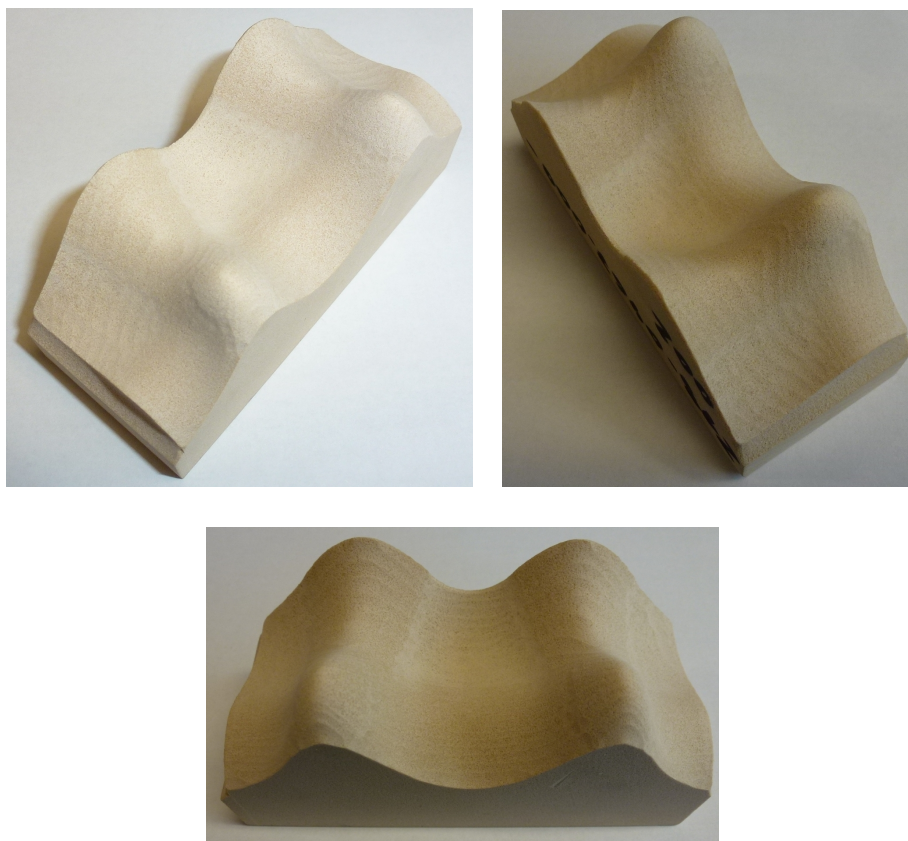


(d) Dokončovací operace – obrábění konkávní části *Obecné plochy* č. 2

Obrázek 6.24: Obrobená *Obecná plocha* č. 2, dle navrhované metody

Tabulka 6.12: Rozdělení obrábění dle potřebného času pro *Obecnou plochu* č. 2

Typ obrábění	Doba obrobení [min]	Celková dráha nástroje [m]
1 oblast (klasický přístup)	4:16 (100 %)	3,8 (100 %)
4 oblasti (nově navrhovaný přístup)	3:28 (81,25 %)	2,91 (76,6 %)



Obrázek 6.25: Obrobená *Obecná plocha č. 2*, dle navrhované metody z různých úhlů pohledu

Závěr

Tato kapitola popisuje celkové shrnutí všech poznatků z disertační práce. Zhodnocení je rozděleno na několik částí. V první části je popsáno zhodnocení dosažených cílů. V druhé části jsou uvedeny směry dalšího výzkumu, které se objevily při řešení této práce.

Zhodnocení dosažených výsledků

Obecné plochy jsou dnes získávány nejen designovým návrhem konstruktéra pomocí CAD systému. Stále více těchto specifických – komplikovaných tvarů – virtuálních modelů je získáváno 3D skenováním. Pro následnou výrobu těchto tvarů je problematické bezkolizní obrobení a to především na víceosých strojích, kde k lineárním osám se přidávají další rotační osy. Díky těmto dalším dostupným stupňům volnosti lze provádět obrábění velice komplikovaných tvarů na jedno upnutí. Bohužel velice problematickou částí je zde „řízení“ vedení nástroje při víceosém frézování.

Navrhovaná metoda v disertační práci představila možnosti rozložení komplikované plochy na několik plátů se stejnými vlastnostmi a tyto pláty lze následně samostatně obrábět s využitím 5osého obrábění. Popsaný zpracovaný algoritmus umožňuje načítat data ve formátu STL. Výstupem algoritmu jsou soubory, které obsahují souřadnice všech rozpoznaných hranic oblastí (konkávní, konvexní, sedlo). Tyto soubory, lze velice jednoduše importovat pro další zpracování v CAD programu Pro/E. Každá oblast je importována jako jedna křivka (spline), kterou lze případně upravit (zjemnit, provést korekce bodů).

Na vytvořeném algoritmu byly provedeny praktické testy na třech plochách. První testovaná prostorová plocha byla definována analyticky – matematickou funkcí. Záměrem bylo otestovat algoritmus pro výpočet všech křivostí, tyto křivosti porovnat s vypočtenými hodnotami z algoritmu a hodnotami z analýz v CAD programů. Dalším záměrem bylo zjistit, jak velkou odchylkou plošného obsahu bude zatížen načtený STL formát oproti analytickému zadání. Zde byla zjištěna chyba do 1 %.

V práci byly řešeny různé metody tvorby mnohoúhelníkové sítě z STL dat tak, aby výsledná síť neobsahovala nějaké extrémy. Dle parametru `velikost_site` se dá řídit – ovládat velikost (hrubost), nově tvořené mnohoúhelníkové sítě. Tento parametr také ovlivňuje „kvalitu“ rozpoznaných oblastí. Dalším parametrem, `detekovana_oblast`, lze ovlivnit velikost rozpoznané oblasti. Pokud plocha obsahuje velké množství velice malých různých oblastí, lze tyto oblasti shrnout do překrývající se společné oblasti.

Další testované obecné plochy představovaly aktuálně řešené tvary. Díky tomuto postupu došlo k časové úspoře min. 10 %. U *Obecné plochy č. 1*, došlo jen k částečné časové úspoře cca 4 %. Bylo zde však docíleno velké úspoře drah nástrojů cca 30 %. To vede k vyšší životnosti nástroje. Při rozdělení plochy na jednotlivé pláty lze efektivněji řídit a kontrolovat nástroj. *Obecné plocha č. 2*, byla opět rozdělena na několik plátů, zde bylo následně docíleno časové úspoře cca 19 %. Úspora drah nástroje v tomto případě byla cca 24 %.

Nevýhodou algoritmu je nutnost použití programového prostředí Matlab. Získané rozpoznané oblasti ploch je nutno dále zpracovat v CAD programech. Matlab neumožňuje exportovat celé rozdělené plochy do dalších CAD/CAM programů.

Další nevýhodou je časové náročnost výpočtu, která je přímo závislá na výpočtovém výkonu CPU a komplikovanosti zadané plochy.

Směry dalšího výzkumu

Algoritmus by mohl být součástí CAD/CAM systémů např. Pro/E, Catia, jako externí program či makro, které umožní import hraniční křivky do CAM programu. Tímto postupem by odpadla část rozdělování ploch v CAD.

Zaměřit se na nové typy funkcí, které umožňují provést generování mnohoúhelníkové sítě z vrcholových bodů.

Otestovat algoritmus na dalších obecných plochách, které jsou rozměrově výrazné a nejsou založeny na čtvercové základně.

Provést úpravy v grafickém znázornění plochy, tak aby výsledná barevná stupnice byla v rozsahu dané křivosti a ne v rozsahu hodnot dané osy.

Literatura

- [1] Bey, M.; Bendifallah, M.; Kader, S.; aj.: Cutting Tool Combination and Machining Strategy Affection Based on the Determination of Local Shapes for Free Form Surfaces. In *Smart Manufacturing Application, 2008. ICSMA 2008. International Conference on*, 2008, s. 120–125, doi:10.1109/ICSMA.2008.4505625.
- [2] Budak, E.; Ozturk, E.; Tunc, L.: Modeling and simulation of 5-axis milling processes. *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, ročník 58, č. 1, 2009: s. 347–350, ISSN 0007-8506, doi:10.1016/j.cirp.2009.03.044.
- [3] Chang, T.; Wysk, R.; Wang, H.: *Computer-aided manufacturing*. Prentice Hall international series in industrial and systems engineering, Prentice Hall, 1998, ISBN 9780137545247.
- [4] Chen, Z. C.; Dong, Z.; Vickers, G. W.: Automated surface subdivision and tool path generation for 31212-axis CNC machining of sculptured parts. *Computers in Industry*, ročník 50, č. 3, 2003: s. 319–331, ISSN 0166-3615, doi:10.1016/S0166-3615(03)00019-8.
- [5] Choi, B.; Jerard, R.: *Sculptured surface machining: theory and applications*. Kluwer Academic Publishers, 1999, ISBN 9780412780202.
- [6] Gray, P. J.; Bedi, S.; Ismail, F.: Arc-intersect method for 5-axis tool positioning. *Computer-Aided Design*, ročník 37, č. 7, 2005: s. 663–674, ISSN 0010-4485, doi:10.1016/j.cad.2004.08.006.
- [7] Hosseinkhani, Y.; Akbari, J.; Vafaeseefat, A.: Penetration-elimination method for five-axis CNC machining of sculptured surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, ročník 47, č. 10, 2007: s. 1625–1635, ISSN 0890-6955, doi:10.1016/j.ijmachtools.2006.11.002.
- [8] Jensen, C.; Red, W.; Pi, J.: Tool selection for five-axis curvature matched machining. *Computer-Aided Design*, ročník 34, č. 3, 2002: s. 251–266, ISSN 0010-4485, doi:10.1016/S0010-4485(01)00086-0.
- [9] Keller, P.; Rach, P.: Vývoj bezkontaktního 3D digitizéru. Optimalizace vlastností strojů a procesů. Oblast d. Technická zpráva, KVS, Technická univerzita v Liberci, Liberec, 2004.

- [10] Lee, Y.-S.: Admissible tool orientation control of gouging avoidance for 5-axis complex surface machining. *Computer-Aided Design*, ročník 29, č. 7, 1997: s. 507–521, ISSN 0010-4485, doi:10.1016/S0010-4485(97)00002-X.
- [11] Lee, Y.-S.; Chang, T.-C.: 2-Phase approach to global tool interference avoidance in 5-axis machining. *Computer-Aided Design*, ročník 27, č. 10, 1995: s. 715–729, ISSN 0010-4485, doi:10.1016/0010-4485(94)00021-5.
- [12] Li, L. L.; Zhang, Y.: Cutter selection for 5-axis milling based on surface decomposition. In *Control, Automation, Robotics and Vision Conference, 2004. ICARCV 2004 8th*, ročník 3, 2004, s. 1863–1868, doi:10.1109/ICARCV.2004.1469443.
- [13] Li, L. L.; Zhang, Y.: Flat-end cutter accessibility determination in 5-axis milling of sculptured surfaces. *Computer-Aided Design & Applications*, ročník 2, č. 1–4, Leden 2005: s. 203–212.
- [14] Makhanov, S.; Anotaipai boon, W.: *Advanced Numerical Methods to Optimize Cutting Operations of Five Axis Milling Machines*. Advanced manufacturing series, Berlin: Springer-Verlag, 2007, ISBN 9783540711216.
- [15] The MathWorks, Inc.: *MATLAB 2012b Documentation*. 2012.
- [16] McMahon, C.; Browne, J.: *CAD-CAM: Principles, Practice and Manufacturing Management: Solutions Manual*. CAD Series, Addison-Wesley Longman, Incorporated, 1999, ISBN 9780201342840.
- [17] Misra, D.; Sundararajan, V.; Wright, P. K.: Zig-Zag Tool Path Generation for Sculptured Surface Finishing. In *DIMACS Series in Discrete Mathematics and Theoretical Computer Science*, American Mathematical Society, říjen 2003, ISBN 9780821871096.
- [18] My, C. A.; Bohez, E. L. J.; Makhanov, S. S.; aj.: On 5-Axis Freeform Surface Machining Optimization: Vector Field Clustering Approach. *International Journal of CAD/CAM*, ročník 5, č. 1, 2005.
- [19] Radzevich, S.: *CAD/CAM of Sculptured Surfaces on a Multi-axis NC Machine: The DG/K-based Approach*. Synthesis lectures on engineering, Morgan & Claypool Publishers, 2008, ISBN 9781598297652.
- [20] Rao, A.; Sarma, R.: On local gouging in five-axis sculptured surface machining using flat-end tools. *Computer-Aided Design*, ročník 32, č. 7, 2000: s. 409–420, ISSN 0010-4485, doi:10.1016/S0010-4485(99)00105-0.
- [21] Ritter, G.; Wilson, J.: *Handbook of computer vision algorithms in image algebra*. Computer science image processing mathematics, CRC Press, 1996, ISBN 9780849326363.
- [22] Rogers, D. F.: *An Introduction to NURBS: With Historical Perspective*. Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics and Geometric Modeling, ISBN 9781558606692.

- [23] Roman, A.; Bedi, S.; Ismail, F.: Three-half and half-axis patch-by-patch NC machining of sculptured surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, ročník 29, č. 5–6, 2006: s. 524–531, ISSN 0268-3768, doi:10.1007/BF02729105.
- [24] Roman Flores, A.: *Surface Partitioning for 3+2-axis Machining*. Disertační práce, University of Waterloo, 2007.
- [25] Sahos, a.s.: Sahos. [online], [vid. 2013-10-18].
URL: <http://www.sahos.cz/produkty/dynamic/>
- [26] Sandvik Coromant: Sandvik Coromant. [online], [vid. 2013-10-16].
URL: <http://www.sandvik.coromant.com>
- [27] Semotánová, Z.: *Gaussova křivost a Gaussovo zobrazení*. Bakalářská práce, Západočeská univerzita v Plzni, 2006.
- [28] Sonka, M.; Hlavac, V.; Boyle, R.: *Image Processing, Analysis, and Machine Vision*. Toronto: Thompson Learning, 2008, ISBN 9780495082521.
- [29] Tournier, C.; Duc, E.: Iso-scallop tool path generation in 5-axis milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, ročník 25, č. 9–10, 2005: s. 867–875, ISSN 0268-3768, doi:10.1007/s00170-003-2054-7.
- [30] Tunc, L.; Budak, E.: Extraction of 5-axis milling conditions from CAM data for process simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, ročník 43, č. 5-6, 2009: s. 538–550, ISSN 0268-3768, doi:10.1007/s00170-008-1735-7.
- [31] Tuong, N. V.: *Free-form surface manufacturing*. Disertační práce, Technical University of Liberec, Liberec, 2009.
- [32] ÚM FSI VUT v Brně: Analytické křivky a plochy. [online], [vid. 2013-10-16].
URL: http://mathonline.fme.vutbr.cz/download.aspx?id_file=1130
- [33] ÚM FSI VUT v Brně: Křivky a plochy technické praxe. [online], [vid. 2013-10-16].
URL: <http://mathonline.fme.vutbr.cz/pg/flash/TeorieGrafika/pocGrafika7.pdf>
- [34] Vero Software: *EdgeCAM 2012 R2 Documentation*. 2012.
- [35] Voráčová, Š.: Plochy počítačové grafiky – Materiály k přednáškám. 2006.
URL: http://www.fd.cvut.cz/personal/voracsar/PocGeom/1_GM_plochy.pdf
- [36] Wang, J.: *Global Finish Curvature Matched Machining*. Diplomová práce, Brigham Young University, Provo, USA, 2005.

- [37] Wang, N.; Tang, K.: Five-axis tool path generation for a flat-end tool based on iso-conic partitioning. *Computer-Aided Design*, ročník 40, č. 12, 2008: s. 1067–1079, ISSN 0010-4485, doi:10.1016/j.cad.2008.09.005.
- [38] Wang, Y. J.; Dong, Z.; Vickers, G. W.: A 3D curvature gouge detection and elimination method for 5-axis CNC milling of curved surfaces. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, ročník 33, č. 3–4, 2007: s. 368–378, ISSN 0268-3768, doi:10.1007/s00170-006-0825-7.
- [39] Warkentin, A.; Hoskins, P.; Ismail, F.; aj.: Systems techniques and computational methods. kapitola Computer-aided 5-axis machining, Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 2001, ISBN 0-8493-0993-X, s. 3001–3034.
- [40] Yamazaki Mazak Europe: Yamazaki Mazak Europe. [online], [vid. 2013-10-18]. URL: <http://www.mazak.eu/Multi-tasking-machines/Integrex-100-IV>
- [41] Zhang, H.; Feng, J.: Non-Uniform Rational B-Spline Curves and Surfaces. 2006. URL: <http://www.cad.zju.edu.cn/home/zhx/GM/008/00-nurbs1.pdf>

Autorovy publikace

- [Sa.1] Keller, P.; Šafka, J.: Plynulé 5-ti osé obrábění na stroji Mazak Integrex 100. In *Výrobní systémy dnes a zítra 2007*, Liberec: TUL – KVS, 6.–7. 12. 2007, ISBN 978-80-7372-295-1.
- [Sa.2] Keller, P.; Šafka, J.: Výroba tvarově složitých dílů na centru MAZAK INTEGREX 100-IV. In *Setkání ústavů a kateder výrobních strojů a robotizace*, Plzeň: Západočeská univerzita v Plzni, 10.–11. 9. 2007, ISBN 978-80-7043-598-4.
- [Sa.3] Pokorný, P.; Zelený, P.; Keller, P.; aj.: Laserový řezač. Technická zpráva, Ústav pro nanomateriály, pokročilé technologie a inovace, 2012.
- [Sa.4] Šafka, J.: *Problematika 5 osé výroby na INTEGREX 100*. Diplomová práce, TUL, Liberec, květen 2007.
- [Sa.5] Šafka, J.: Creation and production of globoidal cam physical model. In *Výrobní systémy dnes a zítra 2008*, Liberec: TUL – KVS, 27.–28. 12. 2008, ISBN 978-80-7372-416-0.
- [Sa.6] Šafka, J.: Praktické zkušenosti s nástrojem Sandvik CoroTurn HP. In *Výrobní systémy dnes a zítra 2008*, Liberec: TUL – KVS, 27.–28. 12. 2008, ISBN 978-80-7372-416-0.
- [Sa.7] Šafka, J.: 3D digitization and 3D printing of prototype models. In *Recenzovaný sborník abstraktů z Mezinárodní Baťovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2011*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 12. 4. 11. 2011, ISBN 978-80-7454-013-4.
- [Sa.8] Šafka, J.; Keller, P.: Comparison of Multi-Profession Tools in Modern Machining Center. *Strojírenská technologie*, ročník ISSN 1211-4162, č. zvláštní, 2008: s. 168–173, ISSN 1801-1128.
- [Sa.9] Šafka, J.; Keller, P.: Creation of Postprocessor for Mazak Integrex 100-IV Machine in EdgeCAM System. In *Recenzovaný sborník abstraktů z Mezinárodní Baťovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2008*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008, ISBN 978-80-7318-663-0.

- [Sa.10] Šafka, J.; Keller, P.: Problems with 5 Axes Cutting on Mazak Integrex 100 Machine. In *2. mezinárodní vědecká konference ICTKI 2008*, Ústí nad Labem: UJEP Ústí nad Labem, 2008, ISBN 978-80-7044-969-1.
- [Sa.11] Šafka, J.; Keller, P.: Problems with 5 Axes Cutting on Mazak Integrex 100 Machine. *Strojírenská technologie*, ročník XIII, č. zvláštní, 2008: s. 106–109, ISSN 1211-4162.
- [Sa.12] Šafka, J.; Keller, P.: Utilization of a Multi-Profession Tool in Modern Machining Centers. In *Recenzovaný sborník abstraktů z Mezinárodní Baťovy konference pro doktorandy a mladé vědecké pracovníky 2008*, Zlín: Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2008, ISBN 978-80-7318-663-0.
- [Sa.13] Šafka, J.; Keller, P.; Vavruška, J.: Modelování a příprava CNC dat globoidní vačky. In *Setkání ústavů a kateder výrobních strojů a robotizace*, Lednice: Vysoké učení technické v Brně, 9.–10. 9. 2008, ISBN 978-80-214-3723-4.
- [Sa.14] Šafka, J.; Lachman, M.; Zelený, P.: The calculation of the curvature of a complicated free-form surface for optimizing five-axis machining. In *International Conference on Innovative Technologies IN-TECH 2013*, Faculty of Engineering University of Rijeka, 10.–13. 9. 2013, ISBN 978-953-6326-88-4, s. 165–168.
- [Sa.15] Šafka, J.; Zelený, P.: Porovnání dvou Rapid Prototyping technologií - FDM a 3D print - POLYJET. In *Vzájemná interakce konstrukce a technologie při vývoji strojních zařízení*, Vysoká škola báňská - Technická univerzita, Fakulta strojní, 2012, s. 82–89.

A. Přílohy

A.1 Obsah CD

Na přiloženém CD je uloženo:

- Disertační práce a téze disertační práce ve formátu PDF.
- 3D data všech použitých ploch v CAD programu Pro/E Wildfire 4.0.
- Vytvořené programy v prostředí Matlab 2012b (64bit.).
- Vytvořené programy obrábění v CAM prostředí EdgeCAM 2012R2 pro řešené plochy.
- Soubory, které obsahují NC dráhy nástrojů pro jednotlivé řešené plochy.

A.2 Základní struktura programu

V této části přílohy je uvedena základní struktura programu.

```
%% Načítání STL souboru
vout=Nacteni_STL('nazev_souboru.stl');

%%
% Minimální počet bodů v oblasti, aby byla plocha detekována
detekovana_oblast = 150;

% Rozdělení osy na určitý počet bodů
velikost_site=120;

% Převod trojúhelníků na čtverce
rangeX=linspace(fix(min(vout(:,1))),fix((max(vout(:,1)))),...
    velikost_site);
rangeY=linspace(fix(min(vout(:,2))),fix((max(vout(:,2)))),...
    velikost_site);
[x,y]=meshgrid(rangeX,rangeY);
z=griddata(vout(:,1),vout(:,2),vout(:,3),x,y,'cubic');
% F=TriScatteredInterp(vout(:,1),vout(:,2),vout(:,3));
```

```

% z= F(x,y);

%% Výpočet Gaussovy křivosti "Gaussova_krivost"
M = zeros(size(x));
[K,H,Kmax,Kmin,nx,ny,nz] = Gaussova_krivost(x,y,z);
surf(x,y,z); hold on;

%% Číselní označení oblastí
% Konkávní - 1
% Kovexní - 2
% Sedlo - 3

%% Identifikace konkávní, konvexní a sedlové oblasti
for i = 1:size(K,1)
    for j = 1:size(K,2)
        if (K(i,j)>=0) & (H(i,j)>0)
            M(i,j) = 1;
        end
        if (K(i,j)>=0) & (H(i,j)<=0)
            M(i,j) = 2;
        end
        if (K(i,j)<0) & (H(i,j)~=0)
            M(i,j) = 3;
        end
    end
end

%% Nalezení hranic a bodů konkávní oblasti
[PB1cell,M1]=Hranice_regionu(M,x,y,z,1);

% Nalezení hranic a bodů konvexní oblasti
[PB2cell,M2]=Hranice_regionu(M,x,y,z,2);

% Nalezení hranic a bodů sedlové oblasti
[PB3cell,M3]=Hranice_regionu(M,x,y,z,3);

%% Vykreslení bodů
for i=1:length(PB1cell)

if length(PB1cell{i}(:,1))>detekovana_oblast
    plot3(PB1cell{i}(:,1),PB1cell{i}(:,2),PB1cell{i}(:,3),...
        'LineStyle','none','Marker','.', 'MarkerSize',15,...
        'MarkerEdgeColor','k');
end

```



```

end

for i=1:length(PB2cell)

if length(PB2cell{i}(:,1))>detekovana_oblast
    plot3(PB2cell{i}(:,1),PB2cell{i}(:,2),PB2cell{i}(:,3),...
        'LineStyle','none','Marker','.', 'MarkerSize',15,...
        'MarkerEdgeColor','w');
end
end

for i=1:length(PB3cell)

if length(PB3cell{i}(:,1))>detekovana_oblast
    plot3(PB3cell{i}(:,1),PB3cell{i}(:,2),PB3cell{i}(:,3),...
        'LineStyle','none','Marker','.', 'MarkerSize',15,...
        'MarkerEdgeColor','g');
end
end

%% Výpočet maxima a minima hlavní křivosti
% Konkávní oblasti
[Kmax1,Kmin1] = MaxMinLocalCurvature(M1,Kmax,Kmin);
% Konvexní oblasti
[Kmax2,Kmin2] = MaxMinLocalCurvature(M2,Kmax,Kmin);
% Sedlové oblast
[Kmax3,Kmin3] = MaxMinLocalCurvature(M3,Kmax,Kmin);

%% Výpočet křivostí jednotlivých částí
%Konvexní
pole_Kmax_Kmin2=Lokalni_krivost(M2,Kmax,Kmin,x,y,z,...
    detekovana_oblast);
%Konkávní
pole_Kmax_Kmin1=Lokalni_krivost(M1,Kmax,Kmin,x,y,z,...
    detekovana_oblast);
%Sedlo
pole_Kmax_Kmin3=Lokalni_krivost(M3,Kmax,Kmin,x,y,z,...
    detekovana_oblast);

%% Zobrazení lokálních křivostí

%Konkávní křivost
textove_pole_konkavni=Textove_pole(pole_Kmax_Kmin1,'Kn');
textove_pole_konkavni=['Konkavní (Kn)';textove_pole_konkavni];

```

```

% Konvexní křivost
%textove_pole_konvexni;
textove_pole_konvexni={'Konvexní (Kx)';[]};

% Sedlo
textove_pole_sedlo=Textove_pole(pole_Kmax_Kmin3,'S');
textove_pole_sedlo=['Sedlo (S)';textove_pole_sedlo];

text('Position',[1,1],'String',...
    [textove_pole_konkavni;textove_pole_konvexni;...
    textove_pole_sedlo],'Units','normalized',...
    'VerticalAlignment','Top','HorizontalAlignment','left');

%% Ukládání dat do souboru
Ulozeni_dat('concave.ibl',PB1cell);
Ulozeni_dat('convex.ibl',PB2cell);
Ulozeni_dat('saddle.ibl',PB3cell);

```